

DIN 6800-2

DIN

ICS 17.240

Ersatz für
DIN 6800-2:1997-10**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 62 Seiten

Normenausschuss Radiologie (NAR) im DIN



Inhalt

Seite

Vorwort	5
1 Anwendungsbereich	6
2 Normative Verweisungen	6
3 Begriffe	7
4 Messprinzip und Messverfahren	10
5 Auswahl der Bauart von IONISATIONSKAMMERN für die Dosismessung und für die Ermittlung von Dosisverteilungen	10
5.1 Allgemeines	10
5.2 PHOTONENSTRAHLUNG mit Grenzenergien von 1 MeV bis 50 MeV	10
5.3 ELEKTRONENSTRAHLUNG mit Energien von 3 MeV bis 50 MeV	10
6 Allgemeines zur Messung der WASSER-ENERGIEDOSIS	11
6.1 Gleichung zur Ermittlung der WASSER-ENERGIEDOSIS	11
6.2 KALIBRIERFAKTOR und BEZUGSBEDINGUNGEN	12
6.3 EINFLUSSGRÖSSEN und KORREKTIONSFAKTOREN	13
6.4 REFERENZBEDINGUNGEN für die Messung der WASSER-ENERGIEDOSIS bei PHOTONEN- und ELEKTRONENSTRAHLUNG aus Beschleunigern	13
6.5 Nicht-Referenzbedingungen und zugehörige KORREKTIONSFAKTOREN	14
6.6 PHANTOM	14
6.7 Positionierung von IONISATIONSKAMMERN bei der Messung	14
6.7.1 BEZUGSPUNKTE von KOMPAKTKAMMERN und FLACHKAMMERN	14
6.7.2 Positionierung von KOMPAKTKAMMERN	14
6.7.3 Positionierung von FLACHKAMMERN	15
7 Ermittlung der strahlungsqualitätsunabhängigen KORREKTIONSFAKTOREN	16
7.1 KORREKTIONSFAKTOR k_p für den Einfluss der Luftdichte	16
7.2 KORREKTIONSFAKTOR k_h für den Einfluss der Luftfeuchte	16
7.3 KORREKTIONSFAKTOR k_s für den Einfluss der unvollständigen Sättigung	16
7.4 KORREKTIONSFAKTOR k_p für den Einfluss der Polarität der Kammeranspannung	17
7.5 KORREKTIONSFAKTOR k_T für andere Temperatureffekte als die Änderung der Luftdichte	18
7.6 KORREKTIONSFAKTOR k_r für den Einfluss der unterschiedlichen Positionierung von KOMPAKTKAMMERN bei der Kalibrierung und bei der Messung	18
8 Messung der WASSER-ENERGIEDOSIS bei PHOTONENSTRAHLUNG	20
8.1 Kennzeichnung und Ermittlung der STRAHLUNGSQUALITÄT	20
8.2 Messung der WASSER-ENERGIEDOSIS unter REFERENZBEDINGUNGEN	21
8.2.1 Bedeutung des KORREKTIONSFAKTORS k_Q	21
8.2.2 Experimentelle Werte des KORREKTIONSFAKTORS k_Q	21
8.2.3 Berechnete Werte des KORREKTIONSFAKTORS k_Q	21
8.3 Messung der WASSER-ENERGIEDOSIS unter Nicht-Referenzbedingungen	26
8.3.1 Allgemeines	26
8.3.2 Werte des KORREKTIONSFAKTORS k_{NR}	26
9 Messung der WASSER-ENERGIEDOSIS bei ELEKTRONENSTRAHLUNG	26
9.1 STRAHLUNGSQUALITÄT und REFERENZTIEFE	26
9.1.1 Kennzeichnung und Ermittlung der STRAHLUNGSQUALITÄT	26
9.1.2 Festlegung der Referenztiefe	27
9.2 Messung der WASSER-ENERGIEDOSIS unter REFERENZBEDINGUNGEN	27
9.2.1 Bedeutung des KORREKTIONSFAKTORS k_E	27
9.2.2 Experimentelle Werte des KORREKTIONSFAKTORS k_E	27
9.2.3 Berechnung des KORREKTIONSFAKTORS k_E	27
9.2.4 Berechnung von k'_E	28
9.2.5 Berechnung von k''_E	28
9.3 Messungen unter Nicht-Referenzbedingungen	33
9.3.1 Allgemeines	33

9.3.2	Berechnung des KORREKTIONSFAKTORS k_{NR}	34
9.3.3	Einfluss der FELDGRÖSSE	36
10	Messunsicherheitsanalyse	37
10.1	Allgemeines	37
10.2	MESSUNSICHERHEITEN bei der Ermittlung der WASSER-ENERGIEDOSIS	37
10.3	MESSUNSICHERHEITEN der Eingangsgrößen	38
10.3.1	KALIBRIERFAKTOR N	38
10.3.2	Um die Nullanzeige M_0 verminderte ANZEIGE M des Dosimeters	38
10.3.3	Korrektur für den Einfluss der Luftdichte k_ρ	38
10.3.4	Korrektur für den Einfluss der Luftfeuchte k_h	38
10.3.5	Korrektur für den Einfluss der unvollständigen Sättigung k_s	39
10.3.6	Korrektur für den Einfluss der Polarität der Kammeranspannung k_p	39
10.3.7	Korrektur für andere Temperatureffekte als die Änderung der Luftdichte k_T	39
10.3.8	Korrektur für die Abweichung von REFERENZBEDINGUNGEN k_{NR}	39
10.3.9	Korrektur für den Einfluss der STRAHLUNGSQUALITÄT der PHOTONENSTRAHLUNG k_Q	40
10.3.10	Korrektur für den Einfluss der STRAHLUNGSQUALITÄT der ELEKTRONENSTRAHLUNG k_E	40
10.4	Beispiele des Messunsicherheitsbudgets für Messungen der WASSER-ENERGIEDOSIS unter REFERENZBEDINGUNGEN	40
Anhang A	(normativ) Korrektur der unvollständigen Sättigung	44
A.1	Experimentelle Bestimmung des KORREKTIONSFAKTORS k_s	44
A.2	Bestimmung des KORREKTIONSFAKTORS k_s für ausgewählte IONISATIONSKAMMERN	46
Anhang B	(informativ) Berechnung der strahlungsqualitätsabhängigen KORREKTIONSFAKTOREN	49
B.1	Verfahren zur Berechnung der KORREKTIONSFAKTOREN von IONISATIONSKAMMERN als Bragg-Gray-Sonden	49
B.2	Zur Positionierung von KOMPAKTKAMMERN und FLACHKAMMERN	52
B.2.1	Berücksichtigung des Verdrängungseffektes bei KOMPAKTKAMMERN	52
B.2.2	Berücksichtigung des Kammermaterials und des Verdrängungseffektes bei FLACHKAMMERN	52
B.3	Verfahren zur Berechnung des KORREKTIONSFAKTORS k_Q für PHOTONENSTRAHLUNG	53
B.3.1	Ermittlung von k'_Q für KOMPAKTKAMMERN	53
B.3.2	Ermittlung von k''_Q für KOMPAKTKAMMERN	53
B.3.3	Ermittlung des KORREKTIONSFAKTORS k_Q für FLACHKAMMERN	54
B.4	Verfahren zur Berechnung des KORREKTIONSFAKTORS k_E für ELEKTRONENSTRAHLUNG	54
B.4.1	Ermittlung von k'_E	54
B.4.2	Ermittlung von k''_E	54
Anhang C	(normativ) Experimentelle Ermittlung von k''_E für FLACHKAMMERN	56
Anhang D	(informativ) Der Einfluss der Luftfeuchte auf das ANSPRECHVERMÖGEN	57
Literaturhinweise		58
Stichwortverzeichnis		61
Bilder		
Bild A.1	— Beispiel eines Jaffé-Diagramms einer FLACHKAMMER. Aufgetragen sind die Kehrwerte der Mittelwerte der bei positiver und negativer Kammeranspannung erhaltenen MESSWERTE gegen die Kehrwerte der Kammeranspannung. Der lineare Bereich erstreckt sich etwa von 50 V bis 200 V (aus [4])	45
Bild D.1	— Abhängigkeit der Luftdichte, des W -Wertes, des MASSEN-STOSSBREMSVERMÖGENS und des KORREKTIONSFAKTORS für die Luftfeuchte von der relativen Luftfeuchte. Dargestellt ist jeweils das Verhältnis des Wertes der jeweiligen Größe bei der entsprechenden Luftfeuchte zum Wert bei der relativen Feuchte von 50 %. Die Abbildung gilt für einen Luftdruck von 101,325 kPa und eine Temperatur von 20 °C	57

Tabellen

Tabelle 1 — Zusammenstellung der EINFLUSSGRÖSSEN und der BEZUGSBEDINGUNGEN	12
Tabelle 2 — Geometrische REFERENZBEDINGUNGEN für die Messung der WASSER-ENERGIEDOSIS bei PHOTONEN- und ELEKTRONENSTRAHLUNG aus Beschleunigern	13
Tabelle 3 — Elektronendichte (Elektronenzahl/Volumen) $\rho_e = (\rho/m_u) (Z/A_r)_{\text{eff}}^a$ für einige Stoffe	15
Tabelle 4 — Berechnung des Korrektionsfaktors k_S : Werte für die in Gleichung (3) einzusetzenden Koeffizienten, angegeben für typische Bauarten von IONISATIONSKAMMERN, sowie Gültigkeitsbereiche von Gleichung (3) für die Dosis pro Puls D^p und Kammerspannung U	17
Tabelle 5 — Werte des Korrektionsfaktors k_r für Kompaktkammern	19
Tabelle 6 — Werte des KORREKTIONSFAKTORS k_Q für den Bereich hochenergetischer PHOTONENSTRAHLUNG mit einem STRAHLUNGSQUALITÄTSINDEX zwischen 0,5 und 0,84. Diese Werte wurden aus den Werten von k_Q nach TRS 398 durch Multiplikation mit dem Faktor $(p_{\text{dis}})_{\text{Co}}/(p_{\text{dis}})_Q$ erhalten (siehe B.2.1)	22
Tabelle 7 — Für die Berechnung von k_E'' benötigte Werte des Innenradius r des Kammervolumens von KOMPAKTKAMMERN, des Wand-Störungsfaktors $(p_{\text{wall}})_{\text{Co}}$ für ^{60}Co -Gammastrahlung und des Verhältnisses der Störungsfaktoren $\frac{(p_{\text{cel}})_{R_{50}}}{(p_{\text{cel}})_{\text{Co}}}$ nach TRS 398	29
Tabelle 8 — Beispiele für berechnete Werte von k_E'' für ELEKTRONENSTRAHLUNG als Funktion der STRAHLUNGSQUALITÄT R_{50} für eine Reihe von KOMPAKTKAMMERN.	31
Tabelle 9 — Werte von k_E'' für einige Bauarten von FLACHKAMMERN, die nach dem in Anhang C angegebenen Verfahren experimentell ermittelt wurden	33
Tabelle 10 — Verhältnis der beschränkten Massen-Stoßbremsvermögen von Wasser zu Luft als Funktion der auf die HALBWERTTIEFE bezogenen Tiefe nach Gleichung (19). Die Tabellenwerte dienen nicht zur Auswertung, sondern zur Veranschaulichung und Kontrolle	35
Tabelle 11 — Messunsicherheitsbudget für die Dosimetrie hochenergetischer PHOTONENSTRAHLUNG aus Beschleunigern mit KOMPAKTKAMMERN	40
Tabelle 12 — Messunsicherheitsbudget für die Dosimetrie hochenergetischer ELEKTRONENSTRAHLUNG mit KOMPAKTKAMMERN	41
Tabelle 13 — Messunsicherheitsbudget für die Dosimetrie hochenergetischer ELEKTRONENSTRAHLUNG mit FLACHKAMMERN	43
Tabelle B.1 — Werte des Faktors $k_Q' = (S_{w,a}^\Delta)_Q / (S_{w,a}^\Delta)_{\text{Co}}$ für $\Delta = 10$ keV in Abhängigkeit vom STRAHLUNGSQUALITÄTSINDEX Q für eine Tiefe von 10 cm, einem Fokus-Oberflächen-Abstand von 100 cm und einer FELDGRÖSSE von 10 cm × 10 cm in der Messtiefe. Die in [25] angegebenen Zahlenwerte der Massen-Stoßbremsvermögensverhältnisse für die STRAHLUNGSQUALITÄT Q wurden durch das Massen-Stoßbremsvermögensverhältnis 1,133 für ^{60}Co -Gammastrahlung dividiert	53

Vorwort

Dieses Dokument (DIN 6800-2:2008-03) wurde vom Normenausschuss Radiologie im DIN Deutsches Institut für Normung e. V. in Arbeitsgemeinschaft mit der Deutschen Röntgengesellschaft sowie in Zusammenarbeit mit der Deutschen Gesellschaft für Medizinische Physik und der Deutschen Gesellschaft für Radioonkologie erarbeitet.

Es wird auf die Möglichkeit hingewiesen, dass einige Texte dieses Dokuments Patentrechte berühren können. Das DIN Deutsches Institut für Normung e. V. ist nicht dafür verantwortlich, einige oder alle diesbezüglichen Patentrechte zu identifizieren.

Die Reihe DIN 6800 *Dosismessverfahren nach der Sondenmethode für Photonen- und Elektronenstrahlung* besteht aus:

- Teil 1: *Allgemeines zur Dosimetrie von Photonen- und Elektronenstrahlung nach der Sondenmethode*
- Teil 2: *Dosimetrie hochenergetischer Photonen- und Elektronenstrahlung mit Ionisationskammern*
- Teil 4: *Filmdosimetrie*
- Teil 5: *Thermolumineszenzdosimetrie*

Änderungen

Gegenüber DIN 6800-2:1997-10 wurden folgende Änderungen vorgenommen:

- a) Der Titel wurde geändert, da der Anwendungsbereich die Röntgenstrahlung mit Erzeugungsspannungen unter 1 MV nicht mehr umfasst. Die Dosimetrie von Röntgenstrahlung mit Erzeugungsspannungen unter 1 MV wird im Rahmen der Neufassung der Normenreihe DIN 6809 behandelt.
- b) Die Gliederung der Norm ist praxisnah gestaltet. Die Messverfahren sind in den Abschnitten 6 bis 9 und die dazugehörige Messunsicherheitsanalyse ist in Abschnitt 10 festgelegt. Die zugrunde liegenden physikalischen Zusammenhänge sind in den Anhängen dargestellt.
- c) Für die Elektronendosimetrie werden zur Berechnung der MASSEN-STOSSBREMSVERMÖGEN anstelle des Ersatz-Anfangsenergie-Verfahrens Methoden verwendet, die aus den in TRS 398 IAEA Code of Practice angegebenen Verfahren hergeleitet wurden.
- d) Als Referenztiefe in der Elektronendosimetrie wird nicht mehr die Tiefe des Dosismaximums, sondern die in TRS 398 festgelegte Referenztiefe verwendet.
- e) FLACHKAMMERN werden nicht mehr bei ELEKTRONENSTRAHLUNG an KOMPAKTKAMMERN angeschlossen, sondern ebenfalls bei ^{60}Co -Gammastrahlung kalibriert. Für einige gebräuchliche FLACHKAMMERN werden die zur Verwendung bei ELEKTRONENSTRAHLUNG erforderlichen KORREKTIONSFAKTOREN angegeben.
- f) Die Ermittlung der MESSUNSICHERHEIT wird gefordert. Das Verfahren für die Messunsicherheitsanalyse wird dargelegt, und Werte für die relativen STANDARDMESSUNSICHERHEITEN der in der Norm behandelten Komponenten werden angegeben.
- g) Die Daten für die Berechnung der KORREKTIONSFAKTOREN und Wechselwirkungskoeffizienten beruhen nicht mehr auf TRS 277 IAEA Code of Practice von 1987 [1], sondern es wurden neuere Daten verwendet, die TRS 398 entnommen wurden. Damit wird internationale Konsistenz in den Ergebnissen der Dosismessung gesichert.

Frühere Ausgaben

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

1 Anwendungsbereich

Diese Norm enthält Regeln zur Ermittlung der WASSER-ENERGIEDOSIS in Wasser und WASSER-ENERGIEDOSIS-LEISTUNG in Wasser mit offenen luftgefüllten IONISATIONSKAMMERN nach dem Sondenverfahren bei Dosismessungen für die perkutane Strahlentherapie mit ^{60}Co -Gammastrahlung und mit Bremsstrahlung bei Erzeugungsspannungen im Bereich von 1 MV bis 50 MV sowie mit ELEKTRONENSTRAHLUNG bei Energien von 3 MeV bis 50 MeV. Messaufgaben sind die Messung der WASSER-ENERGIEDOSIS unter REFERENZ-BEDINGUNGEN, unter Nicht-Referenzbedingungen sowie die Messung von relativen Dosisverteilungen in Wasser.

Geschlossene IONISATIONSKAMMERN sind für die Messaufgaben nach dieser Norm nicht zu verwenden.

Allgemeine Regeln zum Sondenverfahren in der Dosimetrie enthält DIN 6800-1. Anforderungen an Dosimeter mit IONISATIONSKAMMERN zur Messung von hochenergetischer Photonen- und ELEKTRONENSTRAHLUNG sind in DIN EN 60731:2006-09 festgelegt. Maßnahmen zur Qualitätssicherung in der Dosimetrie für die Strahlentherapie sind in dieser Norm nicht festgelegt.

2 Normative Verweisungen

Die folgenden zitierten Dokumente sind für die Anwendung dieses Dokuments erforderlich. Bei datierten Verweisungen gilt nur die in Bezug genommene Ausgabe. Bei undatierten Verweisungen gilt die letzte Ausgabe des in Bezug genommenen Dokuments (einschließlich aller Änderungen).

DIN 1319-1:1995-01, *Grundlagen der Messtechnik — Teil 1: Grundbegriffe*

DIN 6800-1, *Dosismessverfahren in der radiologischen Technik — Allgemeines zur Dosimetrie von Photonen- und Elektronenstrahlung nach der Sondenmethode*

DIN 6800-5:2005-04, *Dosismessverfahren nach der Sondenmethode für Photonen- und Elektronenstrahlung — Teil 5: Thermolumineszenzdosimetrie*

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

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

DIN EN 60731:2006-09, *Medizinische elektrische Geräte — Dosimeter mit Ionisationskammern zur Anwendung in der Strahlentherapie (IEC 60731:1997 + A1:2002); Deutsche Fassung EN 60731:1997 + A1:2002*

E DIN IEC 60050-394, *Internationales Elektrotechnisches Wörterbuch — Teil 394: Nukleare Instrumentierung: Geräte (IEC 1/1939/CDV:2004)*

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

96/708815 DC, *International Vocabulary of Basic and General Terms in Metrology (IVM 2:1993)*, deutsch: *Internationales Wörterbuch der Metrologie*, 2. Auflage 1994, Deutsches Institut für Normung — Beuth-Verlag

TRS 398, *Absorbed Dose Determination in External Beam Radiotherapy. An International Code of Practice for Dosimetry Based on Standards of Absorbed Dose to Water*. International Atomic Energy Agency (2000), Wien

3 Begriffe

Für die Anwendung dieses Dokuments gelten die Begriffe nach DIN 6800-1, DIN 6814-2:2000-07, DIN 6814-3, DIN EN 60731:2006-09, E DIN IEC 60050-394 und die folgenden Begriffe.

ANMERKUNG Der bei einigen Begriffen in spitzen Klammern angegebene Begriff <Sondenmethode> kennzeichnet den Anwendungsbereich der Definition.

3.1

Ansprechvermögen

R

<Sondenmethode> Quotient aus der um die Nullanzeige M_0 verminderten ANZEIGE M und dem Wert der sie verursachenden DOSIS D

3.2

Anzeige

M

durch ein Messgerät zur Verfügung gestellter Wert einer Größe

[IVM 2:1993]

ANMERKUNG Die Größe kann die MESSGRÖSSE, ein Messsignal oder eine andere Größe sein, die zur Errechnung des Wertes der MESSGRÖSSE zu benutzen ist.

3.3

Bezugsbedingungen

Bedingungen, unter denen alle EINFLUSSGRÖSSEN und Geräteparameter ihre BEZUGSWERTE annehmen

[DIN EN 60731:2006-09]

ANMERKUNG Davon zu unterscheiden sind die REFERENZBEDINGUNGEN (siehe 3.22).

3.4

Bezugspunkt

<Sondenmethode> vom HERSTELLER angegebener Punkt der IONISATIONSKAMMER, durch dessen Lage im Raum die Position der IONISATIONSKAMMER gekennzeichnet wird

3.5

Bezugswert

Wert einer EINFLUSSGRÖSSE (oder Geräteparameter), der für Bezugszwecke ausgewählt wurde, d. h. ein Wert einer EINFLUSSGRÖSSE (oder Geräteparameter), bei dem der KORREKTIONSAKTOR bezüglich der Abhängigkeit von dieser EINFLUSSGRÖSSE (oder Geräteparameter) den Wert eins annimmt

[DIN EN 60731:2006-09]

3.6

Einflussgröße

jede externe Größe, die das Betriebsverhalten eines Gerätes beeinflussen kann

[DIN EN 60731:2006-09]

ANMERKUNG 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 Strahleneinfallsrichtung bei der Messung der DOSIS).

3.7

Energieabhängigkeit

Abhängigkeit des ANSPRECHVERMÖGENS eines Detektors von der STRAHLUNGSQUALITÄT

3.8

Flachkammer

IONISATIONSKAMMER mit einem Messvolumen von typischerweise $0,01 \text{ cm}^3$ bis $0,5 \text{ cm}^3$, deren Elektroden planparallel zueinander angeordnet sind, wobei die Schichtdicke des Messvolumens in Strahlungseinfallsrichtung wesentlich kleiner ist als in der dazu senkrechten Richtung und kleiner ist als die Breite der Schutzelektrode

3.9

Ionisationsdosimeter

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

3.10

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

[DIN EN 60731:2006-09]

3.11

Kalibrierfaktor

N

bei einer Kammereinheit mit zugehörigem Anzeigegerät der Faktor zur Umrechnung der unter BEZUGSBEDINGUNGEN erhaltenen oder auf BEZUGSBEDINGUNGEN korrigierten ANZEIGE in den richtigen Wert der MESSGRÖSSE am BEZUGSPUNKT der IONISATIONSKAMMER

3.12

Kompaktkammer

IONISATIONSKAMMER mit einem Messvolumen von typischerweise $0,01 \text{ cm}^3$ bis $1,0 \text{ cm}^3$, das von einer festen äußeren Elektrode begrenzt wird, an einem Stiel befestigt ist und üblicherweise symmetrisch zur Achse des Stiels angeordnet ist

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

3.13

Korrektionsfaktor

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

ANMERKUNG KORREKTIONSFAKTOREN werden durch Messung und/oder Rechnung ermittelt und sind dementsprechend unsicher. Daher ist ein vollständiger Ausgleich nicht möglich.

3.14

Messgröße

physikalische Größe, der die Messung gilt

[DIN 1319-1:1995-01]

3.15

Messort

<Sondenmethode> Punkt in dem durch die Messsonde ungestörten PHANTOM, für den der MESSWERT der WASSER-ENERGIEDOSIS ermittelt wird

3.16

Messtiefe

<Sondenmethode> Tiefenkoordinate des MESSORTES in dem durch die Messsonde ungestörten PHANTOM

3.17

Messunsicherheit

Kennwert, der aus Messungen gewonnen wird und zusammen mit dem Messergebnis zur Kennzeichnung eines Wertebereiches für den wahren Wert der MESSGRÖSSE dient

[DIN 1319-1:1995-01]

ANMERKUNG 1 Die MESSUNSICHERHEIT ist ein Maß für die Genauigkeit der Messung und kennzeichnet die Streuung oder den Bereich derjenigen Werte, die der MESSGRÖSSE vernünftigerweise als Schätzwerte für den wahren Wert zugewiesen werden können [11]. Sie kann auch als ein Maß für die Unkenntnis der MESSGRÖSSE aufgefasst werden.

ANMERKUNG 2 Die MESSUNSICHERHEIT kann auch ganz allgemein eine bei der Auswertung von Messungen beteiligte Größe betreffen, ohne dass diese eine MESSGRÖSSE zu sein braucht. Die Benennung STANDARDMESSUNSICHERHEIT wird verwendet, wenn herausgestellt werden soll, dass die MESSUNSICHERHEIT durch eine Standardabweichung ausgedrückt wird.

3.18

Messwert

Wert, der zur MESSGRÖSSE gehört und der Ausgabe eines Messgerätes oder einer Messeinrichtung eindeutig zugeordnet ist

[DIN 1319-1:1995-01]

3.19

nationales Normal

Normal, das in einem Land durch nationalen Beschluss als Basis zur Festlegung der Werte aller anderen Normale der betreffenden Größe anerkannt ist

[IVM 2:1993]

3.20

Nenngebrauchsbereich

Wertebereich einer EINFLUSSGRÖSSE oder eines Geräteparameters, in dem das Gerät innerhalb der Garantiefehlergrenzen arbeitet

3.21

Primärnormal-Messeinrichtung

Messeinrichtung, die nach allgemeiner Beurteilung die höchsten metrologischen Forderungen erfüllt, und die unabhängig von anderen Messeinrichtungen für dieselbe Größe akzeptiert ist

3.22

Referenzbedingungen

Bedingungen, für die die KORREKTIONSAKTOREN zur Berücksichtigung des Einflusses der STRAHLUNGS-QUALITÄT gelten

3.23

Störungsfaktor

p

Produkt aus Einzelstörungsfaktoren p_i , mit denen die strahlungsqualitätsabhängigen Abweichungen von den BRAGG-GRAY-BEDINGUNGEN berücksichtigt werden. Sie sind in den KORREKTIONSAKTOREN k_Q und k_E enthalten

3.24

Strahlungsqualitätsindex

Q

Parameter, durch den die RELATIVE SPEKTRALE TEILCHENFLUSSDICHTHE einer ULTRAHARTEN PHOTONENSTRAHLUNG charakterisiert wird

[DIN 6814-2:2000-07]

3.25

wasseräquivalente Schichtdicke

d_{aq}

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 gebildeten 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 erzeugte und gesammelte Ladung, die die 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 Messung der WASSER-ENERGIEDOSIS mit IONISATIONSKAMMERN, die mit ^{60}Co -Gammastrahlung im Wasserphantom zur ANZEIGE der WASSER-ENERGIEDOSIS in der Einheit Gray (Gy) kalibriert sind (siehe 6.2). Messungen der WASSER-ENERGIEDOSIS bei anderen Photonenstrahlungsqualitäten als ^{60}Co -Gammastrahlung und bei ELEKTRONENSTRAHLUNG werden durch die Anwendung von KORREKTIONSFAKTOREN ermöglicht. Die Messergebnisse können durch Multiplikation mit Umrechnungsfaktoren in die materialspezifische ENERGIEDOSIS für andere, die IONISATIONSKAMMER umgebende Materialien umgerechnet werden (siehe DIN 6800-1).

5 Auswahl der Bauart von IONISATIONSKAMMERN für die Dosismessung und für die Ermittlung von Dosisverteilungen

5.1 Allgemeines

Die Wahl einer bestimmten Bauart richtet sich nach

- a) der Messaufgabe,
- b) der STRAHLUNGSQUALITÄT,
- c) den geometrischen Bestrahlungsbedingungen (unter anderem der FELDGRÖSSE),
- d) dem Dosisgradienten am MESSORT und
- e) der Richtungsverteilung aller zur Dosis am MESSORT beitragenden Strahlungsanteile.

Typische Messaufgaben sind die Messung der WASSER-ENERGIEDOSIS in der REFERENZTIEFE unter Nicht-Referenzbedingungen und die Messung von relativen Dosisverteilungen. Die Bauart der Sonde muss so gewählt werden, dass eine möglichst geringe Störung des STRAHLUNGSFELDES verursacht wird. Die Bauarten sind in 5.2 und 5.3 entsprechend der Verwendung für die jeweilige Strahlungsart und -qualität angegeben.

5.2 PHOTONENSTRAHLUNG mit Grenzenergien von 1 MeV bis 50 MeV

Für Messaufgaben der Dosimetrie von PHOTONENSTRAHLUNG wird die WASSER-ENERGIEDOSIS an dem jeweiligen MESSORT mit einer KOMPAKTKAMMER nach DIN EN 60731 ermittelt. Ausgenommen sind MESSORTE im Anfangsbereich des Dosisaufbaugesbietes unterhalb etwa 80 % des Dosismaximums. FLACHKAMMERN werden bei hochenergetischer PHOTONENSTRAHLUNG nur für die Messung von relativen Dosisverteilungen, z. B. im Dosisaufbaugesbiet und in der Nähe von ebenen Grenzflächen, verwendet.

5.3 ELEKTRONENSTRAHLUNG mit Energien von 3 MeV bis 50 MeV

Für Messaufgaben der Dosimetrie von ELEKTRONENSTRAHLUNG wird empfohlen, die WASSER-ENERGIEDOSIS bei allen STRAHLUNGSQUALITÄTEN mit FLACHKAMMERN nach DIN EN 60731 zu messen. Bei Elektronenenergien mit einer HALBWERTTIEFE R_{50} kleiner als 4 cm, d. h. unterhalb einer mittleren Energie an der Oberfläche von etwa 10 MeV, ist die Verwendung von FLACHKAMMERN zwingend vorgeschrieben, bei höheren Energien können auch KOMPAKTKAMMERN nach DIN EN 60731 verwendet werden.

ANMERKUNG Die Bauweise einer FLACHKAMMER mit einer breiten Schutzelektrode bewirkt, dass der Fluenz-Störfaktor für ELEKTRONENSTRAHLUNG (siehe B.4.2) gleich eins wird. Obwohl die Breite der Schutzelektrode der Markus-Kammer nicht den Festlegungen nach DIN EN 60731:2006-09 entspricht, werden die für ihre Anwendung erforderlichen Daten wegen der weiten Verbreitung der Markus-Kammer in dieser Norm angegeben.

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 nach der folgenden Gleichung berechnet:

$$D = (M - M_0) \cdot N \cdot \prod_{i=1}^n k_i \quad (1)$$

Dabei ist

- M die ANZEIGE des Dosimeters (bei der im Kalibrierschein angegebenen Kammerspannung und Polarität und bei Positionierung der IONISATIONSKAMMER nach den Regeln dieser Norm),
- M_0 die Nullanzeige des Dosimeters ohne Bestrahlung,
- N der KALIBRIERFAKTOR für die WASSER-ENERGIEDOSIS,
- $\prod k_i$ das Produkt aller KORREKTIONSFAKTOREN.

Die KORREKTIONSFAKTOREN k_i und die entsprechenden EINFLUSSGRÖSSEN sind im Einzelnen:

- k_p Luftdichte, siehe 7.1,
- k_h Luftfeuchte, siehe 7.2,
- k_s unvollständige Sättigung, siehe 7.3,
- k_p Polarität der Kammerspannung, siehe 7.4,
- k_r unterschiedliche Positionierung von KOMPAKTKAMMERN bei der Kalibrierung und bei der Messung, siehe 7.6,
- k_T Temperatur, ausgenommen Effekte der Luftdichte, siehe 7.5,
- k_Q STRAHLUNGSQUALITÄT der PHOTONENSTRAHLUNG in der REFERENZTIEFE, siehe 8.2,
- k_E STRAHLUNGSQUALITÄT der ELEKTRONENSTRAHLUNG in der REFERENZTIEFE, siehe 9.2,
- k_{NR} spektrale Verteilung und Richtungsverteilung der Photonen und Elektronen bei Messungen unter Nicht-Referenzbedingungen, siehe 8.3 und 9.3.

Der KORREKTIONSFAKTOR k_Q ist nur bei PHOTONENSTRAHLUNG, der KORREKTIONSFAKTOR k_E nur bei ELEKTRONENSTRAHLUNG anzuwenden. Sowohl bei Messungen unter REFERENZBEDINGUNGEN als auch bei Messungen unter Nicht-Referenzbedingungen sind die jeweiligen Werte der KORREKTIONSFAKTOREN k_p bis k_T anzuwenden.

Gleichung (1) beschreibt das Auswertungsmodell zur Messung der WASSER-ENERGIEDOSIS, das für die Ermittlung der MESSUNSICHERHEIT (siehe Abschnitt 10) nach DIN V ENV 13005 erforderlich ist.

6.2 KALIBRIERFAKTOR und BEZUGSBEDINGUNGEN

Der KALIBRIERFAKTOR eines IONISATIONSDOSIMETERS wird so ermittelt, dass sich unter BEZUGSBEDINGUNGEN die WASSER-ENERGIEDOSIS D aus dem Produkt der ANZEIGE M und des KALIBRIERFAKTORS N ohne KORREKTIONSFAKTOREN ergibt. Die wichtigsten EINFLUSSGRÖSSEN und die zugehörigen BEZUGSBEDINGUNGEN sind in Tabelle 1 angegeben.

Tabelle 1 — Zusammenstellung der EINFLUSSGRÖSSEN und der BEZUGSBEDINGUNGEN

EINFLUSSGRÖSSE	BEZUGSBEDINGUNG
STRAHLUNGSQUALITÄT	^{60}Co -Gammastrahlung
Strahlungseinfallsrichtung	Festgelegte Vorzugsrichtung
Dosisleistung	Keine Sättigungsverluste
Phantommaterial	Wasser
Phantomabmessungen	Quasi-unendlicher Halbraum ^a
MESSTIEFE	5 cm
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
Schutzhülse zur Abdichtung der IONISATIONSKAMMER	Bei der Kalibrierung festgelegt
Positionierung der IONISATIONSKAMMER	BEZUGSPUNKT in 5 cm Tiefe auf dem Zentralstrahl
Abstand Quelle — MESSORT	100 cm
FELDGRÖSSE in 5 cm Tiefe ^b	10 cm x 10 cm
Relativer Gradient der Tiefendosisverteilung in 5 cm Tiefe	0,006 mm ⁻¹

^a Das heißt so groß, dass eine weitere Vergrößerung keine Änderung des MESSWERTES zur Folge hat.

^b FELDGRÖSSE festgelegt durch die Halbwertbreite der lateralen Dosisverteilung im PHANTOM.

Muss eine Kammer im Wasserphantom mit einer Schutzhülse versehen werden, oder ist zur Halterung eine Hülse erforderlich, so darf die Wanddicke (aus einem Material, das ausreichend luft- bzw. wasseräquivalent ist) im Bereich des Messvolumens nicht dicker als 1 mm sein. Die Hülse muss sowohl bei der Kalibrierung als auch bei der Messung verwendet werden.

Der KALIBRIERFAKTOR N eines IONISATIONSDOSIMETERS für die WASSER-ENERGIEDOSIS D wird in einem Kalibrierlabor als das Verhältnis des mit einem Normaldosimeter in der Bezugstiefe gemessenen Wertes der WASSER-ENERGIEDOSIS zu der für BEZUGSBEDINGUNGEN geltenden ANZEIGE M des Dosimeters ermittelt. Die Kalibrierung des Normaldosimeters sollte auf die PRIMÄRNORMAL-MESSEINRICHTUNG der Physikalisch-Technischen Bundesanstalt rückführbar sein. Das Messergebnis der PRIMÄRNORMAL-MESSEINRICHTUNG wird als richtiger Wert der MESSGRÖSSE angesehen. Die STANDARDMESSUNSICHERHEIT des KALIBRIERFAKTORS muss angegeben sein.

ANMERKUNG 1 Bei den Vergleichsmessungen im Rahmen der Messtechnischen Kontrollen wird davon ausgegangen, dass die Kalibrierungen der Dosimeter auf die PRIMÄRNORMAL-MESSEINRICHTUNG der Physikalisch-Technischen Bundesanstalt rückführbar sind. Bei Rückführbarkeit auf PRIMÄRNORMAL-MESSEINRICHTUNG anderer Metrologieinstitute können sich geringfügig andere Kalibrierfaktoren ergeben. Dies hat Auswirkungen auf das Ergebnis der Messtechnischen Kontrollen.

ANMERKUNG 2 Bei der Ausführung einer Kalibrierung können nicht immer alle BEZUGSBEDINGUNGEN (z. B. die BEZUGSBEDINGUNGEN für Luftdruck und Temperatur) eingehalten werden. Die Abweichungen sind so berücksichtigt, dass der KALIBRIERFAKTOR für die BEZUGSBEDINGUNGEN gilt.

6.3 EINFLUSSGRÖSSEN und KORREKTIONSFAKTOREN

Die bei der Bestimmung der WASSER-ENERGIEDOSIS vorliegenden Messbedingungen weichen in der Regel von den BEZUGSBEDINGUNGEN ab, für die der KALIBRIERFAKTOR ermittelt wurde. Die Abweichung der EINFLUSSGRÖSSEN von ihren BEZUGSWERTEN bewirkt, dass das Produkt NM vom Wert der WASSER-ENERGIEDOSIS am MESSORT abweicht. EINFLUSSGRÖSSEN können als Störgrößen von außen einwirken (z. B. Temperatur, Luftdichte, Luftfeuchte, Netzspannung), als Geräteeigenschaften aus dem Gerät selbst stammen (Nullpunktwanderung, Alterung der Bauteile, Anlaufzeit usw.), oder als Größen des STRAHLUNGSFELDES, die bei der Ausführung der Messung notwendig sind, in Erscheinung treten (z. B. die STRAHLUNGSQUALITÄT, die Dosisleistung bei der Messung der DOSIS).

Die Auswirkungen der Abweichung der EINFLUSSGRÖSSEN von den BEZUGSBEDINGUNGEN 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 Abschnitten 0, 8 und 9 im Einzelnen behandelt.

In der Praxis entscheidet die angestrebte MESSUNSICHERHEIT darüber, welche Einflüsse durch Korrekturen erfasst und welche in die MESSUNSICHERHEIT einbezogen werden. Um die MESSUNSICHERHEIT möglichst gering zu halten, sind für alle EINFLUSSGRÖSSEN KORREKTIONSFAKTOREN anzuwenden, wenn deren Wert um mehr als 0,1 % von eins abweicht. Die STANDARDMESSUNSICHERHEIT der KORREKTIONSFAKTOREN ist im Unsicherheitsbudget (siehe Abschnitt 10) zu berücksichtigen, ebenso der durch nicht erfolgte Anwendung von Korrekturen entstehende Beitrag zur MESSUNSICHERHEIT.

6.4 REFERENZBEDINGUNGEN für die Messung der WASSER-ENERGIEDOSIS bei PHOTONEN- und ELEKTRONENSTRAHLUNG aus Beschleunigern

Die REFERENZBEDINGUNGEN für Messungen bei anderen STRAHLUNGSQUALITÄTEN als unter BEZUGSBEDINGUNGEN sind in Tabelle 2 zusammengestellt. Sie stellen die Bedingungen dar, auf die die KORREKTIONSFAKTOREN k_Q und k_E bezogen sind.

Die in Tabelle 1 angegebenen geometrischen BEZUGSBEDINGUNGEN für die MESSTIEFE und die FELDGRÖSSE sind für Messungen bei anderen Strahlungsarten als der Bezugsstrahlungsqualität ^{60}Co -Gammastrahlung nicht geeignet. Bei PHOTONENSTRAHLUNG aus Beschleunigern können außerhalb des PHANTOMS entstandene Streuelekttronen das ANSPRECHVERMÖGEN einer IONISATIONSKAMMER beeinflussen. Bei ELEKTRONENSTRAHLUNG ist die Reichweite im Energiebereich unterhalb von 10 MeV nicht ausreichend, um in 5 cm Wassertiefe zu gelangen. Außerdem ändert sich das den KORREKTIONSFAKTOR k_E bestimmende Massen-Stoßbremsvermögensverhältnis von Wasser zu Luft stark in Abhängigkeit von der Tiefe und der FELDGRÖSSE. In der REFERENZTIEFE z_{ref} lässt sich k_E unabhängig von der Beschleunigerbauart mit einer Anpassungsformel ermitteln.

Tabelle 2 — Geometrische REFERENZBEDINGUNGEN für die Messung der WASSER-ENERGIEDOSIS bei PHOTONEN- und ELEKTRONENSTRAHLUNG aus Beschleunigern

Strahlungsart	MESSTIEFE in cm	FELDGRÖSSE an der Oberfläche in cm × cm	Fokus-Oberflächen- Abstand in cm
PHOTONENSTRAHLUNG	10	10 × 10	100
ELEKTRONENSTRAHLUNG	z_{ref}^a	20 × 20	100

^a z_{ref} wird nach Gleichung (10) berechnet.

Für die anderen EINFLUSSGRÖSSEN gelten die BEZUGSBEDINGUNGEN nach Tabelle 1.

ANMERKUNG 1 Im Unterschied zu TRS 398 (FELDGRÖSSE 10 cm x 10 cm) wurde für ELEKTRONENSTRAHLUNG die FELDGRÖSSE 20 cm x 20 cm gewählt, um in der MESSTIEFE den Dosisanteil der an der Elektronenblende gestreuten und hierdurch in Richtung und Energie veränderten Elektronen zu minimieren.

ANMERKUNG 2 Falls die in Tabelle 2 angegebenen Werte der FELDGRÖSSE an der Phantomboberfläche nicht einstellbar sind, können die angegebenen Werte der FELDGRÖSSE alternativ auch in der MESSTIEFE eingestellt werden. Ebenso kann, falls der angegebene Fokus-Oberflächen-Abstand nicht einstellbar ist, alternativ auch ein Fokus-Messort-Abstand von 100 cm verwendet werden. Diese Modifikationen haben einen vernachlässigbaren Einfluss auf die Messunsicherheit.

6.5 Nicht-Referenzbedingungen und zugehörige KORREKTIONSFAKTOREN

Bei Messungen in anderen Tiefen, außerhalb des Zentralstrahls, bei anderen FELDGRÖSSEN und bei anderen Fokus-Oberflächen-Abständen ist der KORREKTIONSFAKTOR k_{NR} für Nicht-Referenzbedingungen zu beachten. Die in Abschnitt 10 ermittelten STANDARDMESSUNSICHERHEITEN gelten bei REFERENZBEDINGUNGEN. Die unter Nicht-Referenzbedingungen gemessenen Werte der WASSER-ENERGIEDOSIS sind mit größeren Unsicherheiten behaftet (siehe Abschnitte 8 und 9).

6.6 PHANTOM

Bei der Messung der WASSER-ENERGIEDOSIS in einem Wasserphantom unter Referenzbedingungen müssen die seitlichen Abmessungen des Wasserphantoms mindestens 5 cm größer sein als die verwendete FELDGRÖSSE in der MESSTIEFE, und die Tiefe des Wasserphantoms muss mindestens 5 cm größer sein als die maximale MESSTIEFE.

Wird bei seitlicher Einstrahlung in das Wasserphantom eine Phantomwand der Schichtdicke d_{Wand} durchstrahlt, so geht deren WASSERÄQUIVALENTE SCHICHTDICKE $d_{\text{e,Wand}} = \frac{\rho_{\text{e,Wand}}}{\rho_{\text{e,w}}} \cdot d_{\text{Wand}}$ in die MESSTIEFE ein. Dabei sind

$\rho_{\text{e,Wand}}$ und $\rho_{\text{e,w}}$ die Elektronendichten von Wandmaterial und Wasser (siehe Tabelle 3). Der Fokus-Messort-Abstand bleibt unverändert.

6.7 Positionierung von IONISATIONSKAMMERN bei der Messung

6.7.1 BEZUGSPUNKTE VON KOMPAKTKAMMERN UND FLACHKAMMERN

Die Positionierung einer IONISATIONSKAMMER im PHANTOM wird mithilfe der Koordinaten ihres BEZUGSPUNKTES im Koordinatensystem des PHANTOMS beschrieben. Bei KOMPAKTKAMMERN ist der BEZUGSPUNKT ein Punkt auf der Kammerachse in der Nähe des Schwerpunktes des Messvolumens. Bei FLACHKAMMERN ist der BEZUGSPUNKT der Mittelpunkt der Innenseite des Strahlungseintrittsfensters. Wenn möglich, wird die Lage des BEZUGSPUNKTES vom Hersteller durch Markierungen auf der Oberfläche der IONISATIONSKAMMER gekennzeichnet.

6.7.2 Positionierung von KOMPAKTKAMMERN

KOMPAKTKAMMERN werden im PHANTOM so positioniert, dass der Bezugspunkt um $r/2$, den halben Innenradius der äußeren Messelektrode, tiefer liegt als der MESSORT.

ANMERKUNG 1 Damit ist die Tiefe, in welcher der BEZUGSPUNKT positioniert wird, um $r/2$ größer als die MESSTIEFE.

ANMERKUNG 2 Durch die angegebene Positionierung wird die Verdrängung von Phantommaterial durch das Luftvolumen der IONISATIONSKAMMER sowie der Einfluss der Krümmung der Kammerwand auf die Eintrittsorte der Sekundärelektronen in das Messvolumen berücksichtigt.

Die Anwendung von KOMPAKTKAMMERN zur Dosismessung im Aufbaubereich der Tiefendosisverteilung von Photonenstrahlung nach dieser Positionierungsregel wird nur für den Tiefenbereich mit mehr als 80 % der Maximaldosis empfohlen.

6.7.3 Positionierung von FLACHKAMMERN

FLACHKAMMERN werden im PHANTOM so positioniert, dass die äquivalente Wassertiefe des BEZUGSPUNKTES mit der MESSTIEFE in Wasser übereinstimmt. Die äquivalente Wassertiefe des BEZUGSPUNKTES ist die Summe aus der Wassertiefe der Frontfläche der FLACHKAMMER und der WASSERÄQUIVALENTEN SCHICHTDICKE des

Strahlungseintrittsfensters $d_{\text{aq}} = \sum_i \frac{\rho_{e,i}}{\rho_{e,w}} d_i$. Der Index i bezeichnet eine Materialschicht mit der Dicke d_i und

der volumenbezogenen Elektronendichte $\rho_{e,i}$, und $\rho_{e,w}$ ist die Elektronendichte von Wasser (siehe Tabelle 3). Eine eventuell vorhandene Schutzkappe der FLACHKAMMER ist in dieser Summe zu berücksichtigen. Die Eintrittsebene der FLACHKAMMER muss senkrecht zur Vorzugsrichtung der Strahlung angeordnet werden.

ANMERKUNG 1 Demnach ist der BEZUGSPUNKT der FLACHKAMMER in die Tiefe $z_B = z_m + d_f - d_{\text{aq}}$ zu bringen; dabei bezeichnet z_m die Messtiefe im ungestörten Wasserphantom und $d_f = \sum d_i$ die Dicke des Strahlungseintrittsfensters, einschließlich der eventuell vorhandenen Schutzkappe.

ANMERKUNG 2 Die unter Berücksichtigung der Elektronendichten berechnete („skalierte“) WASSERÄQUIVALENTE SCHICHTDICKE des Strahlungseintrittsfensters gewährleistet bei Photonenstrahlung die gleiche Wahrscheinlichkeit von Compton-Streuprozessen und bei Elektronenstrahlung in guter Näherung den gleichen mittleren Energieverlust durch Kollisionen wie das tatsächliche Strahlungseintrittsfenster.

ANMERKUNG 3 Die angegebene Berechnung der äquivalenten Wassertiefe des BEZUGSPUNKTES stellt eine für die klinische Dosimetrie ausreichende Näherung dar. Anhang B.2.2 enthält Angaben über noch eingehendere Untersuchungen der äquivalenten Wassertiefe des BEZUGSPUNKTES von FLACHKAMMERN.

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

Stoff	Chemische Bruttoformel oder Massenanteile	Dichte ρ in g cm^{-3}	$(Z/A_r)_{\text{eff}}$	ρ_e in 10^{23} cm^{-3}	$\rho_e/\rho_{e,w}$
Wasser	H ₂ O (20°C)	0,998	0,555 1	3,336	1,000
Polystyrol	C ₈ H ₈	1,029	0,537 7	3,332	0,999
RW3	98 % Polystyrol + 2 % TiO ₂	1,045	0,536 4	3,376	1,012
Polyethylen niedriger Dichte	CH ₂	0,92	0,570 3	3,160	0,947
Polyethylen hoher Dichte	CH ₂	0,94	0,570 3	3,228	0,968
Solid water (RMI-457)	H 0,081; C 0,672; N 0,024; O 0,198; Cl 0,001; Ca 0,023	1,030	0,539 5	3,346	1,003
PMMA	C ₅ H ₈ O ₂	1,19 ^b	0,539 4	3,833	1,149

^a m_u ist die Atommassenkonstante ($m_u = 1,660 54 \cdot 10^{-27} \text{ kg}$), und A_r ist die relative Atommasse.

^b Herstellerangaben beachten.

7 Ermittlung der strahlungsqualitätsunabhängigen KORREKTIONSFAKTOREN

7.1 KORREKTIONSFAKTOR k_p für den Einfluss der Luftdichte

Der KORREKTIONSFAKTOR k_p für die Luftdichte berücksichtigt bei offenen IONISATIONSKAMMERN die Einflüsse des Luftdrucks p und der Temperatur T :

$$k_p = \frac{p_0 T}{p T_0} \quad (2)$$

Die BEZUGSWERTE von Luftdruck und Temperatur sind nach Tabelle 1 $p_0 = 101,325 \text{ kPa}$ und $T_0 = 293,15 \text{ K}$ ($= 20 \text{ °C}$).

ANMERKUNG 1 Näheres zur Ermittlung des Luftdruckes, siehe [3].

ANMERKUNG 2 Bei Diskrepanzen zwischen den nach Gleichung (2) berechneten und den mit der radioaktiven Kontrollvorrichtung erhaltenen Werten des Korrekturfaktors k_p müssen die Ursachen untersucht werden (z. B. durch Überprüfung der Messgeräte).

7.2 KORREKTIONSFAKTOR k_h für den Einfluss der Luftfeuchte

Eine Korrektur für den Einfluss der Luftfeuchte k_h ist innerhalb der durch DIN EN 60731:2006-09 festgelegten Grenzen des Mindest-NENNGEBRAUCHSBEREICHES der relativen Luftfeuchte von 30 % bis 75 % und der absoluten Luftfeuchte (Wasserdampfdichte) von $\rho_w \leq 20 \text{ g m}^{-3}$ im Allgemeinen nicht erforderlich. Der Einfluss der Luftfeuchte ist im Unsicherheitsbudget zu berücksichtigen. Weitere Angaben finden sich in Anhang D.

7.3 KORREKTIONSFAKTOR k_s für den Einfluss der unvollständigen Sättigung

Bei hohen Dosisleistungen tritt ein Verlust an Ionen durch Rekombination ein („unvollständige Sättigung“). Der Effekt hängt außer von der Dosisleistung bzw. der Dosis je Puls von der Geometrie der Kammer und der angelegten Kammer-Spannung ab. Er wird durch den KORREKTIONSFAKTOR k_s berücksichtigt.

Für die in Tabelle 4 angegebenen Bauarten von IONISATIONSKAMMERN wird der KORREKTIONSFAKTOR k_s für gepulste Strahlung nach folgender Zahlenwertgleichung berechnet (siehe Anhang A):

$$k_s = 1 + \frac{\gamma + \delta \cdot D^p}{U} \quad (3)$$

Dabei ist D^p die WASSER-ENERGIEDOSIS pro Puls am MESSORT, ausgedrückt in mGy, und U die Kammer-Spannung in V. Der Koeffizient γ berücksichtigt Verluste aufgrund der Anfangsrekombination und der Diffusion, δ aufgrund der Volumenrekombination. Werte für die Koeffizienten sind Tabelle 4 zu entnehmen. Gleichung (3) gilt nur für die in Tabelle 4 angegebenen Pulsdosen und Bereiche der Betriebsspannung U der IONISATIONSKAMMER. Weiterhin muss die Frequenz der Strahlungspulse kleiner als der Kehrwert der IONENSAMMELZEIT bei der verwendeten Kammer-Spannung sein.

Nur für die Ionisationsarbeit

Tabelle 4 — Berechnung des Korrektionsfaktors k_s : Werte für die in Gleichung (3) einzusetzenden Koeffizienten, angegeben für typische Bauarten von IONISATIONSKAMMERN, sowie Gültigkeitsbereiche von Gleichung (3) für die Dosis pro Puls D^p und Kammer-spannung U

Bauart der IONISATIONSKAMMER	γ in V	δ in V mGy ⁻¹	WASSER-ENERGIEDOSIS pro Puls D^p in mGy	Kammer- spannung U in V	IONENSAMMELZEIT in ms
PTW 30006/30013 Farmer	0,01	3,44	0,15 – 0,35 > 0,35 – 42	100 – 300 300 – 400	0,13 bei 400 V
PTW 23332 Rigid	0,13	1,05	0,15 – 0,5 > 0,5 – 5,5	100 – 250 250 – 400	0,05 bei 400 V
PTW 31002/31010 Flexible	0,38	2,40	0,15 – 0,6 > 0,6 – 5,5	100 – 300 300 – 400	0,17 bei 400 V
PTW 34001 Roos	0,06	1,69	0,15 – 0,5 > 0,5 – 42	50 – 200 200 – 300	0,13 bei 200 V
PTW 34045 Advanced Markus	0,43	0,49	0,25 – 1,0 > 1,0 – 5,5	50 – 200 200 – 300	0,02 bei 300 V
PTW 23343 Markus	0,32	1,99	0,15 – 0,55 > 0,55 – 3,0	100 – 250 250 – 300	0,09 bei 300 V
Scdx-Wellhöfer PPC40	0,07	1,54	0,25 – 0,5 > 0,5 – 2,0	100 – 150 150 – 500	0,09 bei 300 V
Scdx-Wellhöfer NACP02	0,48	2,37	0,25 – 1,0 > 1,0 – 1,3 > 1,3 – 2,0	100 – 150 150 – 200 200 – 400	0,13 bei 200 V

ANMERKUNG Die in Tabelle 4 angegebenen Werte wurden [4] entnommen.

Für Werte der Dosis je Puls, die außerhalb der in der Tabelle 4 angegebenen Werte liegen, für kontinuierliche Strahlung und für Kammern, die nicht in Tabelle 4 aufgeführt sind, ist k_s nach Anhang A experimentell zu ermitteln.

Für gepulste und periodisch abgelenkte Strahlung („swept-beam“ oder „scanning-beam technique“ bei ELEKTRONENSTRAHLUNG) wird k_s nach TRS 398 bestimmt.

7.4 KORREKTIONSFAKTOR k_p für den Einfluss der Polarität der Kammer-spannung

Die Abhängigkeit des Betrages der ANZEIGE von der Polarität der Kammer-spannung 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 aus den Ladungen dieser Elektronen erhöht oder erniedrigt die ANZEIGE, was beim Umpolen der Kammer-spannung sichtbar wird.

Der Polaritätseffekt tritt sowohl bei PHOTONEN- als auch bei ELEKTRONENSTRAHLUNG auf. Er hängt von der Strahlungsart und -qualität, bei ELEKTRONENSTRAHLUNG auch von der Tiefe im PHANTOM und der FELDGRÖSSE, sowie von der Kammerbauart, insbesondere von der Größe und Dicke der Messelektrode, ab. Dieser Effekt weist auch eine Exemplarstreuung auf. Daher muss jede Kammer einzeln überprüft werden.

Der KALIBRIERFAKTOR einer Kammer gilt für die im Kalibrierschein angegebene Polarität (Polarität 1) und ist daher durch den Polaritätseffekt bei BEZUGSBEDINGUNGEN beeinflusst. Wird die Kammer bei anderen STRAH-

LUNGSQUALITÄTEN als der Bezugsstrahlungsqualität verwendet, so ändert sich der Polaritätseffekt relativ zu dem bei ^{60}Co -Gammastrahlung. Diese Änderung wird mit dem KORREKTIONSFAKTOR k_p berücksichtigt nach:

$$k_p = \frac{\left(\frac{M_1 + M_2}{M_1} \right)_{O.E.}}{\left(\frac{M_1 + M_2}{M_1} \right)_{Co}} \quad (4)$$

Dabei ist M_1 der Betrag der ANZEIGE bei der gewöhnlich benutzten Polarität der Kammerspannung, M_2 derjenige bei der entgegengesetzten Polarität. Die ANZEIGEN M_1 und M_2 sind mit der gleichen DOSIS zu erzeugen. Der Index Co bezieht sich auf die Messung bei ^{60}Co -Gammastrahlung. Wenn ^{60}Co -Gammastrahlung nicht zur Verfügung steht, kann zur Bestimmung des Nenners in Gleichung (4) anstelle der Messung bei ^{60}Co -Gammastrahlung näherungsweise die Photonenstrahlungsqualität mit der niedrigsten verfügbaren Grenzenergie (möglichst im Bereich von 4 MeV bis 6 MeV) verwendet werden. Auf die Änderung der Luftdichte während der Messung ist zu achten, und ggf. ist ihre Auswirkung zu korrigieren.

Das ANSPRECHVERMÖGEN einer Kammer darf sich bei der Umpolung der Kammerspannung und bei den vorgesehenen Betriebsbedingungen (Strahlungsart, MESSTIEFE im PHANTOM usw.) um nicht mehr als 1 % ändern (siehe DIN EN 60731:2006-09). Vor Verwendung von ANZEIGEN nach der Umpolung sollte sich das ANSPRECHVERMÖGEN stabilisiert haben. Die Kontrolle des Polaritätseffektes und die Ermittlung von k_p sollten nach Herstelleranweisung ausgeführt werden.

7.5 KORREKTIONSFAKTOR k_T für andere Temperatureffekte als die Änderung der Luftdichte

Die Temperatur beeinflusst das ANSPRECHVERMÖGEN nicht nur über die Luftdichte (siehe KORREKTIONSFAKTOR k_p nach 7.1), sondern auch über Bauteile des Anzeigergerätes und der IONISATIONSKAMMER. In der Regel ist der funktionale Zusammenhang zwischen k_T und Temperatur nicht bekannt. In diesem Fall muss für k_T der Wert 1,0 angenommen werden, eventuelle Temperatureinflüsse sollen im Unsicherheitsbudget berücksichtigt werden.

7.6 KORREKTIONSFAKTOR k_r für den Einfluss der unterschiedlichen Positionierung von KOMPAKTKAMMERN bei der Kalibrierung und bei der Messung

Bei der Kalibrierung einer KOMPAKTKAMMER im Kalibrierlaboratorium mit ^{60}Co -Gammastrahlung wird der auf der Kammerachse liegende BEZUGSPUNKT in die Bezugstiefe im PHANTOM gebracht. Bei der Messung der WASSER-ENERGIEDOSIS nach Gleichung (1) werden jedoch, wie in 6.7 festgelegt, KOMPAKTKAMMERN im Phantom so positioniert, dass der BEZUGSPUNKT um $r/2$ tiefer liegt als der MESSORT. Hierdurch erreicht man, wie in Anhang B ausführlich dargelegt, eine durch den Verdrängungseffekt nicht beeinflusste ENERGIEABHÄNGIGKEIT des Ansprechvermögens im Bereich der PHOTONENSTRAHLUNG aus Beschleunigern sowie eine einheitliche Positionierungsvorschrift für den ansteigenden und den abfallenden Bereich der Photonen-Tiefendosiskurve und für die Elektronendosimetrie.

Würde man die Ionisationskammer bei der Kalibrierung wie bei der Messung positionieren, hätte der KALIBRIERFAKTOR entsprechend der Tiefendosisverteilung einen höheren Zahlenwert, da sich die Kammer dann in einer um $r/2$ größeren Phantomtiefe befände. Für Messungen enthält daher Gleichung (1) neben dem Faktor N immer den Faktor $k_r > 1$. Zur Berechnung von k_r gilt die Beziehung

$$k_r = 1 + \left| \delta \right| \frac{r}{2} \quad (5)$$

r ist der Innenradius der äußeren Messelektrode; $|\delta|$ ist der Betrag des relativen Gradienten der Tiefendosis-kurve in der Bezugstiefe bei der Kalibrierung mit ^{60}Co -Gammastrahlung. Unter den Bezugsbedingungen nach Tabelle 1 gilt $|\delta| = 0,006 \text{ mm}^{-1}$.

Korrektionsfaktoren k_r sind in Tabelle 5 angegeben. Falls für eine Bauart kein Wert für k_r angegeben ist, kann dieser mit Gleichung (5) berechnet werden.

ANMERKUNG Bei der Kalibrierung wird die Verschiebung um $r/2$ nicht durchgeführt, damit künftig mögliche neue Erkenntnisse über die erforderliche Verschiebung des Bezugspunktes nicht zu Änderungen der Kalibrierfaktoren führen.

Tabelle 5 — Werte des Korrektionsfaktors k_r für Kompaktkammern

Bauart der IONISATIONSKAMMER	Innenradius des Kammervolumens in mm	KORREKTIONSFAKTOR k_r
Capintec PR-05P mini	2,0	1,006
Capintec PR-05 mini	2,0	1,006
Capintec PR-06C/G Farmer	3,2	1,010
Exradin A2 Spokas	4,8	1,014
Exradin T2 Spokas	4,8	1,014
Exradin A1 mini Shonka	2,0	1,006
Exradin T1 mini Shonka	2,0	1,006
Exradin A12 Farmer	3,1	1,009
Far West Tech IC-18	2,3	1,007
FZH TK 01	3,5	1,011
Nuclear Assoc 30-750	2,0	1,006
Nuclear Assoc 30-749	3,0	1,009
Nuclear Assoc 30-744	3,0	1,009
Nuclear Assoc 30-716	3,0	1,009
Nuclear Assoc 30-753 Farmer shortened	3,1	1,009
Nuclear Assoc 30-751 Farmer	3,1	1,009
Nuclear Assoc 30-752 Farmer	3,1	1,009
NE 2515	3,0	1,009
NE 2515/3	3,2	1,010
NE 2577	3,2	1,010
NE 2505 Farmer	3,0	1,009
NE 2505/A Farmer	3,0	1,009
NE 2505/3,3A Farmer	3,2	1,010
NE 2505/3,3B Farmer	3,2	1,010
NE 2571 Farmer	3,2	1,010
NE 2581 Farmer	3,2	1,010
NE 2561/2611 Sec Std	3,7	1,011
PTW 23323 Micro	1,6	1,005
PTW 23331 Rigid	4,0	1,012
PTW 23332 Rigid	2,5	1,008
PTW 23333 Farmer	3,1	1,009
PTW 30001/30010 Farmer	3,1	1,009
PTW 30002/30011 Farmer	3,1	1,009
PTW 30004/30012 Farmer	3,1	1,009

Tabelle 5 (fortgesetzt)

Bauart der IONISATIONSKAMMER	Innenradius des Kammervolumens in mm	KORREKTIONSFAKTOR k_r
PTW 30006/30013 Farmer	3,1	1,009
PTW 31002/31010 Flexible	2,8	1,008
PTW 31003/31013 Flexible	2,8	1,008
PTW 31006 PinPoint	1,0	1,003
PTW 31014 PinPoint	1,0	1,003
SCN 100700-0 Farmer	3,1	1,009
SCN 100700-1 Farmer	3,1	1,009
Victoreen Radocon III 550	2,5	1,008
Victoreen Radocon II 555	2,4	1,007
Victoreen 30-348	2,5	1,008
Victoreen 30-351	3,1	1,009
Victoreen 30-349	4,0	1,012
Victoreen 30-361	2,4	1,007
Scdx-Wellhöfer CC01	1,0	1,003
Scdx-Wellhöfer CC04/IC04	2,0	1,006
Scdx-Wellhöfer CC08/IC05/IC06	3,0	1,009
Scdx-Wellhöfer CC13/IC10/IC15	3,0	1,009
Scdx-Wellhöfer CC25/IC25	3,0	1,009
Scdx-Wellhöfer FC23-C/IC28 Farmer shortened	3,1	1,009
Scdx-Wellhöfer FC65-P/IC69 Farmer	3,1	1,009
Scdx-Wellhöfer FC65-G/IC70 Farmer	3,1	1,009

ANMERKUNG Die Maße der IONISATIONSKAMMERN in Tabelle 5 wurden TRS 398 entnommen.

8 Messung der WASSER-ENERGIEDOSIS bei PHOTONENSTRAHLUNG

8.1 Kennzeichnung und Ermittlung der STRAHLUNGSQUALITÄT

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 50 MV hängt das Spektrum 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. Deshalb reicht es nicht aus, die STRAHLUNGSQUALITÄT beim Eintritt der Strahlung in ein PHANTOM allein durch die Erzeugungsspannung zu charakterisieren. Zur Dosisermittlung wird die STRAHLUNGSQUALITÄT 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 FELDGRÖSSE 10 cm x 10 cm (oder 10 cm Durchmesser) am MESSORT.

In dieser Norm 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 FELDGRÖSSE an der Oberfläche von 10 cm x 10 cm ermittelt. Die Kammer ist nach 6.7 zu positionieren. Der Zusammenhang wird durch folgende Anpassungsgleichung beschrieben:

$$Q = 1,266 \cdot \frac{M_{(20)}}{M_{(10)}} - 0,059 \quad (6)$$

Auf die Änderung der Luftdichte während der Messung ist zu achten, ggf. ist ihre Auswirkung zu korrigieren.

ANMERKUNG Der STRAHLUNGSQUALITÄTSINDEX Q wird in TRS 398 als $TPR_{20,10}$ bezeichnet.

8.2 Messung der WASSER-ENERGIEDOSIS unter REFERENZBEDINGUNGEN

8.2.1 Bedeutung des KORREKTIONSFAKTORS k_Q

Der KORREKTIONSFAKTOR k_Q berücksichtigt die Änderung des ANSPRECHVERMÖGENS der IONISATIONSKAMMER infolge der Verwendung bei der STRAHLUNGSQUALITÄT Q unter REFERENZBEDINGUNGEN nach Tabelle 2 anstelle der Bezugs-Strahlungsqualität ^{60}Co -Gammastrahlung.

8.2.2 Experimentelle Werte des KORREKTIONSFAKTORS k_Q

Sind für eine vorliegende IONISATIONSKAMMER k_Q -Werte für alle verwendeten STRAHLUNGSQUALITÄTEN mit einer relativen STANDARDMESSUNSICHERHEIT von weniger als 1 % bestimmt worden, dann sind diese Werte den berechneten Werten vorzuziehen. Für die experimentelle Ermittlung muss ein Dosimetriesystem zur Verfügung stehen, dessen ANSPRECHVERMÖGEN von der Energie der hochenergetischen PHOTONENSTRAHLUNG unabhängig ist (z. B. Wasser-Energiedosiskalorimeter).

8.2.3 Berechnete Werte des KORREKTIONSFAKTORS k_Q

Die in Tabelle 6 angegebenen Werte von k_Q sind nach dem in B.3 beschriebenen Verfahren berechnet worden. Sie gelten unter den REFERENZBEDINGUNGEN nach Tabelle 2 mit der in 10.3.9 angegebenen Unsicherheit.

Tabelle 6 — Werte des KORREKTIONSFAKTORS k_Q für den Bereich hochenergetischer PHOTONENSTRAHLUNG mit einem STRAHLUNGSQUALITÄTSINDEX zwischen 0,5 und 0,84. Diese Werte wurden aus den Werten von k_Q nach TRS 398 durch Multiplikation mit dem Faktor $(p_{\text{dis}})_{\text{Co}}/(p_{\text{dis}})_Q$ erhalten (siehe B.2.1)

Bauart der IONISATIONSKAMMER	STRAHLUNGSQUALITÄTSINDEX Q														
	0,50	0,53	0,56	0,59	0,62	0,65	0,68	0,70	0,72	0,74	0,76	0,78	0,80	0,82	0,84
Capintec PR-05P mini	1,006	1,004	1,002	1,001	0,999	0,997	0,994	0,992	0,989	0,985	0,980	0,972	0,965	0,956	0,945
Capintec PR-05 mini	1,006	1,004	1,002	1,001	0,999	0,997	0,994	0,992	0,989	0,985	0,980	0,972	0,965	0,956	0,945
Capintec PR-06C/G Farmer	1,005	1,003	1,001	0,998	0,997	0,993	0,989	0,987	0,984	0,980	0,976	0,967	0,960	0,950	0,937
Exradin A2 Spokas	1,007	1,004	1,002	1,000	0,997	0,994	0,992	0,989	0,987	0,983	0,980	0,972	0,963	0,953	0,938
Exradin T2 Spokas	1,008	1,004	1,000	0,996	0,991	0,985	0,980	0,975	0,972	0,967	0,963	0,955	0,946	0,937	0,924
Exradin A1 mini Shonka	1,004	1,003	1,001	1,000	0,999	0,997	0,994	0,992	0,989	0,984	0,979	0,971	0,963	0,953	0,941
Exradin T1 mini Shonka	1,005	1,002	0,999	0,996	0,992	0,987	0,982	0,978	0,973	0,968	0,962	0,954	0,946	0,938	0,926
Exradin A12 Farmer	1,005	1,003	1,001	1,000	0,998	0,995	0,991	0,989	0,987	0,982	0,977	0,970	0,961	0,951	0,937
Far West Tech IC-18	1,008	1,004	1,000	0,997	0,992	0,987	0,981	0,977	0,973	0,968	0,963	0,956	0,949	0,941	0,929
FZH TK 01	1,006	1,003	1,001	0,998	0,995	0,991	0,987	0,984	0,980	0,976	0,970	0,963	0,954	0,946	0,931
Nuclear Assoc 30-750	1,003	1,002	1,000	0,999	0,997	0,995	0,992	0,989	0,986	0,982	0,976	0,968	0,960	0,950	0,937
Nuclear Assoc 30-749	1,005	1,002	1,001	0,999	0,997	0,994	0,992	0,989	0,986	0,980	0,976	0,968	0,959	0,951	0,935
Nuclear Assoc 30-744	1,005	1,002	1,001	0,999	0,997	0,994	0,992	0,989	0,986	0,980	0,976	0,968	0,959	0,951	0,935

Tabelle 6 (fortgesetzt)

Bauart der IONISATIONSKAMMER	STRAHLUNGSQUALITÄTSINDEX Q														
	0,50	0,53	0,56	0,59	0,62	0,65	0,68	0,70	0,72	0,74	0,76	0,78	0,80	0,82	0,84
Nuclear Assoc 30-716	1,005	1,002	1,001	0,999	0,997	0,994	0,992	0,989	0,986	0,980	0,976	0,968	0,959	0,951	0,935
Nuclear Assoc 30-753 Farmer shortened	1,005	1,002	1,001	0,999	0,997	0,994	0,991	0,989	0,986	0,981	0,976	0,969	0,960	0,950	0,936
Nuclear Assoc 30-751 Farmer	1,006	1,004	1,001	0,999	0,996	0,992	0,988	0,986	0,982	0,977	0,973	0,965	0,956	0,947	0,933
Nuclear Assoc 30-752 Farmer	1,008	1,005	1,002	1,000	0,997	0,994	0,990	0,988	0,986	0,981	0,977	0,970	0,962	0,953	0,940
NE 2515	1,005	1,003	1,001	0,999	0,996	0,992	0,989	0,985	0,981	0,976	0,971	0,963	0,954	0,945	0,931
NE 2515/3	1,009	1,006	1,003	1,000	0,997	0,993	0,990	0,988	0,985	0,982	0,978	0,970	0,964	0,955	0,942
NE 2577	1,009	1,006	1,003	1,000	0,997	0,993	0,990	0,988	0,985	0,982	0,978	0,970	0,964	0,955	0,942
NE 2505 Farmer	1,005	1,003	1,001	0,999	0,996	0,992	0,989	0,985	0,981	0,976	0,971	0,963	0,954	0,945	0,931
NE 2505/A Farmer	1,009	1,005	1,002	0,997	0,994	0,988	0,983	0,979	0,975	0,970	0,965	0,958	0,950	0,942	0,930
NE 2505/3,3A Farmer	1,009	1,006	1,003	1,000	0,997	0,993	0,990	0,988	0,985	0,982	0,978	0,970	0,964	0,955	0,942
NE 2505/3,3B Farmer	1,010	1,006	1,002	0,999	0,995	0,989	0,984	0,981	0,976	0,972	0,967	0,959	0,952	0,944	0,931
NE 2571 Farmer	1,009	1,006	1,003	1,000	0,997	0,993	0,990	0,988	0,985	0,982	0,978	0,970	0,964	0,955	0,942
NE 2581 Farmer	1,009	1,005	1,002	0,998	0,994	0,989	0,983	0,980	0,976	0,971	0,966	0,958	0,951	0,943	0,930
NE 2561/2611 Sec Std	1,011	1,006	1,002	0,999	0,997	0,992	0,989	0,986	0,984	0,980	0,977	0,970	0,963	0,954	0,941
PTW 23323 Micro	1,005	1,004	1,000	0,999	0,996	0,992	0,989	0,985	0,982	0,978	0,973	0,965	0,957	0,950	0,938

Tabelle 6 (fortgesetzt)

Bauart der IONISATIONSKAMMER	STRAHLUNGSQUALITÄTSINDEX Q														
	0,50	0,53	0,56	0,59	0,62	0,65	0,68	0,70	0,72	0,74	0,76	0,78	0,80	0,82	0,84
PTW 23331 Rigid	1,009	1,005	1,001	0,999	0,996	0,991	0,987	0,984	0,981	0,977	0,973	0,965	0,958	0,949	0,936
PTW 23332 Rigid	1,007	1,004	1,001	0,999	0,996	0,993	0,988	0,986	0,981	0,977	0,973	0,964	0,957	0,949	0,938
PTW 23333 Farmer	1,008	1,005	1,002	0,999	0,996	0,992	0,987	0,985	0,982	0,977	0,972	0,965	0,958	0,949	0,936
PTW 30001/30010 Farmer	1,008	1,005	1,002	0,999	0,996	0,992	0,987	0,985	0,982	0,977	0,972	0,965	0,957	0,949	0,936
PTW 30002/30011 Farmer	1,010	1,006	1,002	0,999	0,996	0,992	0,989	0,987	0,984	0,980	0,976	0,969	0,962	0,953	0,941
PTW 30004/30012 Farmer	1,010	1,007	1,003	0,999	0,996	0,994	0,991	0,989	0,986	0,982	0,978	0,971	0,964	0,956	0,943
PTW 30006/30013 Farmer	1,006	1,004	1,001	0,999	0,996	0,992	0,987	0,985	0,981	0,976	0,971	0,964	0,955	0,946	0,933
PTW 31002/31010 Flexible	1,006	1,004	1,001	0,999	0,996	0,992	0,988	0,985	0,981	0,977	0,971	0,964	0,956	0,947	0,934
PTW 31003/31013 Flexible	1,006	1,004	1,001	0,999	0,996	0,992	0,988	0,985	0,981	0,977	0,971	0,964	0,956	0,947	0,934
PTW 31006 PinPoint	1,005	1,004	1,001	0,999	0,998	0,994	0,991	0,988	0,984	0,979	0,973	0,965	0,957	0,949	0,938
PTW 31014 PinPoint	1,005	1,004	1,001	0,999	0,998	0,994	0,991	0,988	0,984	0,979	0,974	0,966	0,957	0,950	0,939
SNC 100700-0 Farmer	1,009	1,006	1,002	0,999	0,997	0,993	0,989	0,986	0,983	0,977	0,972	0,965	0,957	0,948	0,936
SNC 100700-1 Farmer	1,011	1,008	1,004	1,001	0,998	0,995	0,992	0,990	0,987	0,982	0,979	0,971	0,964	0,955	0,944
Victoreen Radocon III 550	1,008	1,005	1,001	0,998	0,995	0,992	0,987	0,984	0,980	0,976	0,972	0,964	0,957	0,949	0,938
Victoreen Radocon II 555	1,008	1,004	1,000	0,997	0,994	0,989	0,984	0,981	0,976	0,972	0,967	0,960	0,952	0,945	0,933
Victoreen 30-348	1,007	1,004	1,000	0,998	0,995	0,991	0,987	0,984	0,979	0,975	0,970	0,962	0,955	0,946	0,935

Tabelle 6 (fortgesetzt)

Bauart der IONISATIONSKAMMER	STRAHLUNGSQUALITÄTSINDEX Q														
	0,50	0,53	0,56	0,59	0,62	0,65	0,68	0,70	0,72	0,74	0,76	0,78	0,80	0,82	0,84
Victoreen 30-351	1,008	1,004	1,001	0,998	0,995	0,990	0,986	0,983	0,980	0,975	0,970	0,963	0,955	0,946	0,934
Victoreen 30-349	1,008	1,004	1,001	0,998	0,995	0,990	0,986	0,982	0,979	0,975	0,971	0,963	0,956	0,947	0,933
Victoreen 30-361	1,007	1,004	1,000	0,998	0,995	0,991	0,987	0,984	0,980	0,976	0,971	0,964	0,956	0,949	0,937
Scdx-Wellhöfer CC01	1,003	1,003	1,002	1,001	1,000	0,998	0,995	0,993	0,990	0,985	0,980	0,971	0,962	0,954	0,942
Scdx-Wellhöfer CC04/IC04	1,003	1,002	1,001	1,000	0,998	0,996	0,993	0,990	0,987	0,982	0,976	0,967	0,959	0,949	0,937
Scdx-Wellhöfer CC08/IC05/IC06	1,005	1,003	1,002	1,000	0,998	0,995	0,993	0,990	0,986	0,981	0,976	0,968	0,959	0,950	0,936
Scdx-Wellhöfer CC13/IC10/IC15	1,005	1,003	1,002	1,000	0,998	0,995	0,993	0,990	0,986	0,981	0,976	0,968	0,959	0,950	0,936
Scdx-Wellhöfer CC25/IC25	1,005	1,003	1,002	1,000	0,998	0,995	0,993	0,990	0,986	0,981	0,976	0,968	0,959	0,950	0,936
Scdx-Wellhöfer FC23-C/IC28 Farmer shortened	1,005	1,003	1,002	1,000	0,998	0,995	0,992	0,990	0,987	0,981	0,976	0,968	0,959	0,949	0,936
Scdx-Wellhöfer FC65-P/IC69 Farmer	1,007	1,004	1,002	0,999	0,997	0,993	0,990	0,987	0,983	0,977	0,972	0,964	0,955	0,946	0,933
Scdx-Wellhöfer FC65-G/IC70 Farmer	1,009	1,006	1,003	1,000	0,997	0,995	0,992	0,989	0,986	0,981	0,977	0,969	0,961	0,952	0,940
ANMERKUNG Zwischenwerte sind linear zu interpolieren. Dabei ist zu beachten, dass Q für Werte kleiner als 0,68 um 0,03 und für Werte größer als 0,68 um 0,02 von Spalte zu Spalte zunimmt.															

8.3 Messung der WASSER-ENERGIEDOSIS unter Nicht-Referenzbedingungen

8.3.1 Allgemeines

Bei Messung der WASSER-ENERGIEDOSIS unter Nicht-Referenzbedingungen nimmt in Gleichung (1) der Faktor k_{NR} von eins verschiedene Werte an. Bei PHOTONENSTRAHLUNG gilt in guter Näherung

$$k_{NR} = \frac{s_{w,a}^{\Delta}(z, F, R, A)}{s_{w,a}^{\Delta}(z_{ref}, F_{ref}, 0 \text{ cm}, A_{ref})} \quad (7)$$

Der Faktor k_{NR} berücksichtigt die Änderung der spektralen Verteilung der Photonen und Sekundärelektronen und damit der beschränkten Massen-Stoßbremsvermögensverhältnisse $s_{w,a}^{\Delta}$ bei Abweichung des MESSORTES (Messtiefe z , Achsenabstand R) vom Referenzpunkt und bei Abweichung der FELDGRÖSSE F und des Fokus-Oberflächen-Abstandes A von ihren Werten unter REFERENZBEDINGUNGEN. Die Störfaktoren (siehe Anhang B) ändern ihre Werte nur unwesentlich. Bei Nicht-Referenzbedingungen sind auch die über die geänderte Dosisleistung beeinflusste Sättigungskorrektur k_s und die Korrektur k_p für den Polaritätseffekt, die durch das geänderte Sekundärelektronenstrahlungsfeld beeinflusst werden, zu beachten. Ein geänderter Fokus-Messort-Abstand führt zu einer geänderten Dosisleistung und wirkt sich ebenfalls auf die Sättigungskorrektur aus.

8.3.2 Werte des KORREKTIONSFAKTORS k_{NR}

Bei ^{60}Co -Gammastrahlung und hochenergetischer PHOTONENSTRAHLUNG ist zu beachten, dass mit zunehmender FELDGRÖSSE und Tiefe der Anteil an niederenergetischer Streustrahlung am MESSORT zunimmt. Da bislang keine ausreichenden Daten über die Feldgrößen- und Tiefenabhängigkeit bekannt sind, wird k_{NR} in Näherung gleich 1 gesetzt.

ANMERKUNG 1 Erste Monte-Carlo-Rechnungen für Erzeugungsspannungen der Photonen von 6 MV [6] ergaben für Feldgrößen bis herunter zu 1 cm^2 für den Quotienten $\frac{s_{w,a}^{\Delta}(F)}{s_{w,a}^{\Delta}(F_{ref})}$ eine Änderung von weniger als 0,3 %. Weitere Daten sind von den zurzeit in Entwicklung befindlichen Monte-Carlo-Verfahren auf der Basis präziser Strahlerkopfmodelle zu erwarten.

ANMERKUNG 2 Auf Schwierigkeiten bei Messungen in Feldern mit dosis- und spektrumsmodifizierenden Komponenten, wie Blöcken, Keilfiltern usw., wird in DIN 6809-6 eingegangen.

9 Messung der WASSER-ENERGIEDOSIS bei ELEKTRONENSTRAHLUNG

9.1 STRAHLUNGSQUALITÄT UND REFERENZTIEFE

9.1.1 Kennzeichnung und Ermittlung der STRAHLUNGSQUALITÄT

Als Parameter zur Kennzeichnung der STRAHLUNGSQUALITÄT von ELEKTRONENSTRAHLUNG dient für dosimetrische Zwecke die HALBWERTTIEFE R_{50} der WASSER-ENERGIEDOSIS. Das ist diejenige Tiefe in Wasser, bei der die WASSER-ENERGIEDOSIS 50 % ihres Maximalwertes annimmt, gemessen bei einem Fokus-Oberflächen-Abstand von 100 cm und einer FELDGRÖSSE an der Oberfläche von mindestens $20 \text{ cm} \times 20 \text{ cm}$ (Ausschluss des Einflusses von Elektronen aus dem Tubus auf die Form der Tiefendosis). Bei einem Wert von $R_{50} \leq 7 \text{ cm}$ (mittlere Elektronenenergie an der Phantomboberfläche $\bar{E}_0 \leq 16 \text{ MeV}$) kann auch eine FELDGRÖSSE von $10 \text{ cm} \times 10 \text{ cm}$ verwendet werden. Die Dicke des Eintrittsfensters der FLACHKAMMER und ggf. des PHANTOMS sind dabei durch die äquivalente Wassertiefe zu berücksichtigen (siehe 6.7).

Die Bestimmung von R_{50} sollte grundsätzlich mit einer FLACHKAMMER erfolgen. Für STRAHLUNGSQUALITÄTEN mit $R_{50} \geq 4 \text{ cm}$ ($\bar{E}_0 \geq 10 \text{ MeV}$) kann auch eine KOMPAKTKAMMER verwendet werden.

Eine IONISATIONSKAMMER liefert eine Tiefen-Ionendosisverteilung und deshalb die HALBWERTTIEFE der Ionen-dosis, $R_{50, \text{Ion}}$. Daraus ergibt sich nach TRS 398 die HALBWERTTIEFE R_{50} der WASSER-ENERGIEDOSIS:

$$R_{50} = 1,029 R_{50, \text{Ion}} - 0,06 \text{ cm } (R_{50, \text{Ion}} \leq 10 \text{ cm}) \quad (8)$$

$$R_{50} = 1,059 R_{50, \text{Ion}} - 0,37 \text{ cm } (R_{50, \text{Ion}} > 10 \text{ cm}) \quad (9)$$

Die Korrekturen der ANZEIGE bezüglich unvollständiger Sättigung und Polarität der Kammer-Spannung müssen in allen Tiefen, mindestens jedoch im Dosismaximum und bei der ungefähren Tiefe von R_{50} durchgeführt werden. Auf die Änderung der Luftdichte während der Messung ist zu achten, ggf. ist der Einfluss der Luftdichte zu korrigieren.

ANMERKUNG Zur Angabe der STRAHLUNGSQUALITÄT der ELEKTRONENSTRAHLUNG dient in der Strahlentherapie auch die mittlere Elektronenenergie an der Phantomboberfläche $\bar{E}_0$, die mithilfe von R_{50} abgeschätzt werden kann (siehe B.4.2.2).

9.1.2 Festlegung der Referenztiefe

Die REFERENZTIEFE z_{ref} ist durch die folgende Zahlenwertgleichung festgelegt

$$z_{\text{ref}} = 0,6 R_{50} - 0,1 \quad (10)$$

mit z_{ref} und R_{50} in cm.

ANMERKUNG In DIN 6809-6 ist für die klinische Anwendung als REFERENZTIEFE für Elektronenstrahlung die Tiefe d_{max} des Dosismaximums festgelegt.

9.2 Messung der WASSER-ENERGIEDOSIS unter REFERENZBEDINGUNGEN

9.2.1 Bedeutung des KORREKTIONSFAKTORS k_E

Der KORREKTIONSFAKTOR k_E berücksichtigt die Änderung des ANSPRECHVERMÖGENS der IONISATIONSKAMMER infolge der Verwendung bei der durch R_{50} gekennzeichneten STRAHLUNGSQUALITÄT unter REFERENZBEDINGUNGEN nach Tabelle 2 anstelle der Bezugs-Strahlungsqualität ^{60}Co -Gammastrahlung.

9.2.2 Experimentelle Werte des KORREKTIONSFAKTORS k_E

Falls für die vorliegende IONISATIONSKAMMER k_E -Werte für alle verwendeten STRAHLUNGSQUALITÄTEN mit einer relativen STANDARDMESSUNSICHERHEIT von weniger als 1 % bestimmt wurden, sind diese Werte den berechneten vorzuziehen. Für die experimentelle Ermittlung muss ein Dosimetriesystem zur Verfügung stehen, dessen ANSPRECHVERMÖGEN von der Energie der hochenergetischen ELEKTRONENSTRAHLUNG unabhängig ist (z. B. Wasser-Energiedosiskalorimeter).

9.2.3 Berechnung des KORREKTIONSFAKTORS k_E

Die Werte von k_E werden nach Gleichung (11) und den in 9.2.4 und 9.2.5 beschriebenen Verfahren berechnet. Sie gelten für die REFERENZTIEFE z_{ref} bei einem Fokus-Oberflächen-Abstand von 100 cm und einer FELDGRÖSSE an der Phantomboberfläche von 20 cm x 20 cm mit der angegebenen Unsicherheit.

ANMERKUNG Weitere Erläuterungen zur Berechnung von k_E finden sich in Anhang B.4.

Der KORREKTIONSFAKTOR k_E wird in einen von der Bauart unabhängigen Faktor k'_E und einen von der Bauart abhängigen Faktor k''_E zerlegt (siehe B.1):

$$k_E = k'_E k''_E \quad (11)$$

9.2.4 Berechnung von k'_E

Für die Referenztiefe ist k'_E nach TRS 398 mit folgender Zahlenwertgleichung zu berechnen:

$$k'_E = 1,106 - 0,1312 \cdot (R_{50})^{0,214} \quad (12)$$

mit R_{50} in cm.

9.2.5 Berechnung von k''_E

9.2.5.1 Allgemeines

Der Faktor k''_E ergibt sich, wie in B.4.2 dargelegt, als Verhältnis der von der Bauart abhängigen Störungsfaktoren für die entsprechende Elektronenstrahlungsqualität R_{50} und für die Bezugsstrahlungsqualität ^{60}Co -Gammastrahlung als

$$k''_E = \frac{(p_{\text{wall}} p_{\text{cav}} p_{\text{cel}} p_{\Delta})_{R_{50}}}{(p_{\text{wall}} p_{\text{cav}} p_{\text{cel}} p_{\Delta})_{\text{Co}}} \quad (13)$$

Dabei korrigiert p_{wall} die Abweichung des Wandmaterials von Wasser, p_{cav} die Störung der Fluenzverteilung der Elektronen durch die Anwesenheit des luftgefüllten Hohlraums, p_{cel} den Einfluss der Mittelelektrode und p_{Δ} den Einfluss der Bauart der IONISATIONSKAMMER auf die Abschneideenergie Δ des beschränkten Massen-Stoßbremsvermögens. Die Ermittlung der einzelnen Störungsfaktoren wird im Folgenden beschrieben. Die unterschiedliche Berechnung von k''_E für KOMPAKTKAMMERN und FLACHKAMMERN ist durch unterschiedliche Werte der einzelnen Störungsfaktoren für beide Kammerbauarten bedingt.

9.2.5.2 k''_E bei KOMPAKTKAMMERN

Für KOMPAKTKAMMERN nimmt Gleichung (13) durch Weglassen der Faktoren, die in sehr guter Näherung eins gesetzt werden, folgende Form an:

$$k''_E = \frac{(p_{\text{cav}} p_{\text{cel}})_{R_{50}}}{(p_{\text{wall}} p_{\text{cel}})_{\text{Co}}} \quad (14)$$

Für eine IONISATIONSKAMMER mit dem Innenradius r ergibt sich $(p_{\text{cav}})_{R_{50}}$ in der Tiefe z_{ref} nach TRS 398 nach folgender Zahlenwertgleichung:

$$(p_{\text{cav}})_{R_{50}} = 1 - 0,0217 \cdot r \cdot e^{-0,153 \cdot R_{50}} \quad (15)$$

mit R_{50} in cm und r in mm.

Tabelle 7 — Für die Berechnung von k_E'' benötigte Werte des Innenradius r des Kammervolumens von KOMPAKTKAMMERN, des Wand-Störungsfaktors $(p_{\text{wall}})_{\text{Co}}$ für ^{60}Co -Gammastrahlung und des Verhältnisses der Störungsfaktoren $\frac{(p_{\text{cel}})_{R_{50}}}{(p_{\text{cel}})_{\text{Co}}}$ nach TRS 398

Bauart der IONISATIONSKAMMER	r in mm	$(p_{\text{wall}})_{\text{Co}}$	$\frac{(p_{\text{cel}})_{R_{50}}}{(p_{\text{cel}})_{\text{Co}}}$
Capintec PR-05P mini	2,0	0,977	1
Capintec PR-05 mini	2,0	0,977	1
Capintec PR-06C/G Farmer	3,2	0,989	1
Exradin A2 Spokas	4,8	0,978	1
Exradin T2 Spokas	4,8	1,013	1
Exradin Al mini Shonka	2,0	0,978	1
Exradin T1 mini Shonka	2,0	1,013	1
Exradin A12 Farmer	3,1	0,984	1
Far West Tech IC-18	2,3	1,016	1
FZH TK 01	3,5	0,996	1
Nuclear Assoc 30-750	2,0	0,986	1
Nuclear Assoc 30-749	3,0	0,986	1
Nuclear Assoc 30-744	3,0	0,986	1
Nuclear Assoc 30-716	3,0	0,986	1
Nuclear Assoc 30-753 Farmer shortened	3,1	0,986	1
Nuclear Assoc 30-751 Farmer	3,1	0,997	1,005
Nuclear Assoc 30-752 Farmer	3,1	0,991	1,005
NE 2515	3,0	1,000	1,005
NE 2515/3	3,2	0,992	1,005
NE 2577	3,2	0,992	1,005
NE 2505 Farmer	3,0	1,000	1,005
NE 2505/A Farmer	3,0	1,012	1,005
NE 2505/3,3A Farmer	3,2	0,992	1,005
NE 2505/3,3B Farmer	3,2	1,009	1,005
NE 2571 Farmer	3,2	0,992	1,005
NE 2581 Farmer	3,2	1,007	1
NE 2561/2611 Sec Std	3,7	0,990	1
PTW 23323 Micro	1,6	1,001	1,005
PTW 23331 Rigid	4,0	1,001	1,005
PTW 23332 Rigid	2,5	1,001	1,005
PTW 23333 Farmer	3,1	1,001	1,005
PTW 30001/30010 Farmer	3,1	1,001	1,005
PTW 30002/30011 Farmer	3,1	0,991	1
PTW 30004/30012 Farmer	3,1	0,991	1,005
PTW 30006/30013 Farmer	3,1	1,001	1,005
PTW 31002/31010 Flexible	2,8	1,001	1,005
PTW 31003/31013 Flexible	2,8	1,001	1,005
PTW 31006 PinPoint	1,0	0,999	1,005
PTW31014 PinPoint	1,0	0,998	1,005

Tabelle 7 (fortgesetzt)

Bauart der IONISATIONSKAMMER	r in mm	$(p_{\text{wall}})_{\text{Co}}$	$\frac{(p_{\text{cel}})_{R_{50}}}{(p_{\text{cel}})_{\text{Co}}}$
SNC 100700-0 Farmer	3,1	1,001	1,005
SNC 100700-1 Farmer	3,1	0,990	1,005
Victoreen Radocon III 550	2,5	0,993	1
Victoreen Radocon II 555	2,4	1,010	1
Victoreen 30-348	2,5	1,001	1
Victoreen 30-351	3,1	1,001	1
Victoreen 30-349	4,0	1,001	1
Victoreen 30-361	2,4	1,001	1
Scdx-Wellhöfer CC01	1,0	0,984	1,005
Scdx-Wellhöfer CC04/IC04	2,0	0,986	1
Scdx-Wellhöfer CC08/IC05/IC06	3,0	0,986	1
Scdx-Wellhöfer CC13/IC10/IC15	3,0	0,986	1
Scdx-Wellhöfer CC25/IC25	3,0	0,986	1
Scdx-Wellhöfer FC23-C/IC28 Farmer shortened	3,1	0,986	1
Scdx-Wellhöfer FC65-P/IC69 Farmer	3,1	0,997	1,005
Scdx-Wellhöfer FC65-G/IC70 Farmer	3,1	0,991	1,005

Die in Tabelle 8 als Beispiele und für Kontrollzwecke angegebenen Werte von k_E'' wurden nach Gleichung (14) unter Verwendung der in Gleichung (15) und Tabelle 7 angegebenen Einzelfaktoren berechnet. Die Tabelle 8 dient zur Veranschaulichung und zur überschlägigen Kontrolle der Rechnung.

Nur für die Kontrolle

Tabelle 8 — Beispiele für berechnete Werte von k_E'' für ELEKTRONENSTRAHLUNG als Funktion der STRAHLUNGSQUALITÄT R_{50} für eine Reihe von KOMPAKTKAMMERN.

Bauart der IONISATIONSKAMMER	R_{50} in cm										
	4,00	4,50	5,00	5,50	6,00	7,00	8,00	10,00	13,00	16,00	20,00
Capintec PR-05P mini	0,999	1,001	1,003	1,004	1,006	1,008	1,010	1,014	1,017	1,020	1,021
Capintec PR-05 mini	0,999	1,001	1,003	1,004	1,006	1,008	1,010	1,014	1,017	1,020	1,021
Capintec PR-06C/G Farmer	0,973	0,976	0,978	0,981	0,983	0,987	0,990	0,996	1,002	1,005	1,008
Exradin A2 Spokas	0,965	0,969	0,973	0,977	0,980	0,986	0,991	0,999	1,008	1,013	1,018
Exradin T2 Spokas	0,931	0,936	0,939	0,943	0,946	0,952	0,957	0,965	0,973	0,978	0,982
Exradin Al mini Shonka	0,998	1,000	1,002	1,003	1,005	1,007	1,009	1,013	1,016	1,019	1,020
Exradin T1 mini Shonka	0,964	0,966	0,967	0,969	0,970	0,972	0,975	0,978	0,981	0,983	0,985
Exradin A12 Farmer	0,979	0,982	0,984	0,987	0,989	0,993	0,996	1,001	1,007	1,010	1,013
Far West Tech IC-18	0,958	0,960	0,961	0,963	0,965	0,967	0,970	0,974	0,978	0,980	0,982
FZH TK 01	0,963	0,966	0,969	0,971	0,974	0,978	0,982	0,988	0,994	0,997	1,000
Nuclear Assoc 30-750	0,990	0,992	0,994	0,995	0,997	0,999	1,001	1,005	1,008	1,010	1,012
Nuclear Assoc 30-749	0,978	0,981	0,983	0,986	0,988	0,992	0,995	1,000	1,005	1,008	1,011
Nuclear Assoc 30-744	0,978	0,981	0,983	0,986	0,988	0,992	0,995	1,000	1,005	1,008	1,011
Nuclear Assoc 30-716	0,978	0,981	0,983	0,986	0,988	0,992	0,995	1,000	1,005	1,008	1,011
Nuclear Assoc 30-753 Farmer shortened	0,977	0,980	0,982	0,985	0,987	0,991	0,994	0,999	1,005	1,008	1,011
Nuclear Assoc 30-751 Farmer	0,971	0,974	0,976	0,979	0,981	0,985	0,988	0,993	0,999	1,002	1,005
Nuclear Assoc 30-752 Farmer	0,977	0,980	0,982	0,985	0,987	0,991	0,994	0,999	1,005	1,008	1,011
NE 2515	0,970	0,972	0,975	0,977	0,979	0,983	0,986	0,991	0,996	0,999	1,002
NE 2515/3	0,975	0,978	0,980	0,983	0,985	0,989	0,992	0,998	1,003	1,007	1,010
NE 2577	0,975	0,978	0,980	0,983	0,985	0,989	0,992	0,998	1,003	1,007	1,010
NE 2505 Farmer	0,970	0,972	0,975	0,977	0,979	0,983	0,986	0,991	0,996	0,999	1,002
NE 2505/A Farmer	0,958	0,961	0,963	0,965	0,967	0,971	0,974	0,979	0,984	0,987	0,990
NE 2505/3,3A Farmer	0,975	0,978	0,980	0,983	0,985	0,989	0,992	0,998	1,003	1,007	1,010
NE 2505/3,3B Farmer	0,959	0,961	0,964	0,966	0,968	0,972	0,976	0,981	0,987	0,990	0,993
NE 2571 Farmer	0,975	0,978	0,980	0,983	0,985	0,989	0,992	0,998	1,003	1,007	1,010
NE 2581 Farmer	0,956	0,958	0,961	0,963	0,966	0,969	0,973	0,978	0,984	0,987	0,990
NE 2561/2611 Sec Std	0,966	0,969	0,972	0,975	0,978	0,982	0,986	0,993	0,999	1,003	1,006
PTW 23323 Micro	0,985	0,986	0,988	0,989	0,990	0,992	0,994	0,996	0,999	1,001	1,002
PTW 23331 Rigid	0,957	0,960	0,963	0,966	0,969	0,974	0,978	0,985	0,992	0,996	1,000
PTW 23332 Rigid	0,974	0,977	0,979	0,981	0,982	0,985	0,988	0,992	0,997	0,999	1,001
PTW 23333 Farmer	0,967	0,970	0,973	0,975	0,977	0,981	0,984	0,989	0,995	0,998	1,001
PTW 30001/30010 Farmer	0,967	0,970	0,973	0,975	0,977	0,981	0,984	0,989	0,995	0,998	1,001
PTW 30002/30011 Farmer	0,972	0,975	0,977	0,980	0,982	0,986	0,989	0,994	1,000	1,003	1,006
PTW 30004/30012 Farmer	0,977	0,98	0,982	0,985	0,987	0,991	0,994	0,999	1,005	1,008	1,011
PTW 30006/30013 Farmer	0,967	0,970	0,973	0,975	0,977	0,981	0,984	0,989	0,995	0,998	1,001
PTW 31002/31010 Flexible	0,971	0,973	0,976	0,978	0,980	0,983	0,986	0,991	0,996	0,999	1,001

Tabelle 8 (fortgesetzt)

Bauart der IONISATIONSKAMMER	R_{s0} in cm										
	4,00	4,50	5,00	5,50	6,00	7,00	8,00	10,00	13,00	16,00	20,00
PTW 31003/31013 Flexible	0,971	0,973	0,976	0,978	0,980	0,983	0,986	0,991	0,996	0,999	1,001
PTW 31006 PinPoint	0,994	0,995	0,996	0,997	0,997	0,999	1,000	1,001	1,003	1,004	1,005
PTW31014 PinPoint	0,995	0,996	0,997	0,998	0,998	1,000	1,001	1,002	1,004	1,005	1,006
SNC 100700-0 Farmer	0,967	0,970	0,973	0,975	0,977	0,981	0,984	0,989	0,995	0,998	1,001
SNC 100700-1 Farmer	0,978	0,981	0,983	0,986	0,988	0,992	0,995	1,000	1,006	1,009	1,012
Victoreen Radocon III 550	0,977	0,980	0,982	0,983	0,985	0,988	0,991	0,995	1,000	1,002	1,004
Victoreen Radocon II 555	0,962	0,964	0,966	0,968	0,970	0,972	0,975	0,979	0,983	0,986	0,988
Victoreen 30-348	0,970	0,972	0,974	0,976	0,977	0,98	0,983	0,987	0,992	0,994	0,996
Victoreen 30-351	0,963	0,965	0,968	0,970	0,972	0,976	0,979	0,984	0,990	0,993	0,996
Victoreen 30-349	0,952	0,955	0,959	0,962	0,964	0,969	0,974	0,980	0,987	0,992	0,995
Victoreen 30-361	0,971	0,973	0,975	0,977	0,978	0,981	0,984	0,988	0,992	0,995	0,997
Scdx-Wellhöfer CC01	1,009	1,010	1,011	1,012	1,012	1,014	1,015	1,017	1,018	1,019	1,020
Scdx-Wellhöfer CC04/IC04	0,990	0,992	0,994	0,995	0,997	0,999	1,001	1,005	1,008	1,010	1,012
Scdx-Wellhöfer CC08/IC05/IC06	0,978	0,981	0,983	0,986	0,988	0,992	0,995	1,000	1,005	1,008	1,011
Scdx-Wellhöfer CC13/IC10/IC15	0,978	0,981	0,983	0,986	0,988	0,992	0,995	1,000	1,005	1,008	1,011
Scdx-Wellhöfer CC25/IC25	0,978	0,981	0,983	0,986	0,988	0,992	0,995	1,000	1,005	1,008	1,011
Scdx-Wellhöfer FC23-C/IC28 Farmer shortened	0,977	0,980	0,982	0,985	0,987	0,991	0,994	0,999	1,005	1,008	1,011
Scdx-Wellhöfer FC65-P/IC69 Farmer	0,971	0,974	0,976	0,979	0,981	0,985	0,988	0,993	0,999	1,002	1,005
Scdx-Wellhöfer FC65-G/IC70 Farmer	0,977	0,980	0,982	0,985	0,987	0,991	0,994	0,999	1,005	1,008	1,011

9.2.5.3 k_E'' bei FLACHKAMMERN

Bei FLACHKAMMERN nimmt Gleichung (13) durch Weglassen der Faktoren, die in guter Näherung eins gesetzt werden, folgende Form an:

$$k_E'' = \frac{(p_{\text{wall}} p_{\Delta})_{R_{s0}}}{(p_{\text{wall}} p_{\text{cav}} p_{\Delta})_{C_0}} \quad (16)$$

Da die gegenwärtig vorliegenden experimentellen Daten und theoretischen Modelle nicht ausreichen, um für die in Gleichung (16) auftretenden Störungsfaktoren gesicherte Werte anzugeben, kann k_E'' nicht berechnet werden. Daher werden in Tabelle 9 durch das in Anhang C dargestellte Verfahren gewonnene Werte von k_E'' angegeben.

Tabelle 9 — Werte von k_E'' für einige Bauarten von FLACHKAMMERN, die nach dem in Anhang C angegebenen Verfahren experimentell ermittelt wurden

Bauart der FLACHKAMMER	k_E''
PTW 34001 Roos	0,981
PTW 34045 Advanced Markus	0,985
PTW 23334 Markus	$0,982 \cdot (p_{\text{cav}})_{R_{50}}^{\text{Markus}}$
Scdx-Wellhöfer NACP-02	0,979
Scdx-Wellhöfer PPC 05	0,986
Scdx-Wellhöfer PPC 15	0,982
Scdx-Wellhöfer PPC 40	0,981

Für die Markus-Kammer, die nicht den Anforderungen an eine FLACHKAMMER genügt und für die daher $(p_{\text{cav}})_{R_{50}} \neq 1$ ist, gilt nach TRS 398 für den in Tabelle 9 auftretenden, von der Strahlungsqualität R_{50} abhängigen Störungsfaktor:

$$(p_{\text{cav}})_{R_{50}}^{\text{Markus}} = 1 - 0,037 \cdot e^{-0,27 \cdot R_{50}} \quad (17)$$

mit R_{50} in cm.

FLACHKAMMERN, die nicht in Tabelle 9 aufgeführt sind, können in Feldern hochenergetischer ELEKTRONENSTRAHLUNG vom Anwender nach dem in Anhang C angegebenen Verfahren zur Ermittlung von k_E'' an KOMPAKTKAMMERN angeschlossen werden.

ANMERKUNG Die theoretische Analyse der experimentell bestimmten Werte von k_E'' nach Tabelle 9 ist noch nicht abgeschlossen. Aktuelle experimentelle und theoretische Untersuchungen (z. B. [44], [45], [49], [50], [50]) weisen auf eine Energieabhängigkeit des Störungsfaktors $(p_{\text{wall}})_{R_{50}}$ hin, die in dem in Anhang C dargestellten Verfahren nicht berücksichtigt ist. Hier werden in näherer Zukunft genauere Ergebnisse erwartet. Ähnliches gilt auch für die Störungsfaktoren $(p_{\text{wall}})_{C_0}$, zu deren Ermittlung bereits experimentelle und theoretische Untersuchungen mit Monte-Carlo-Methoden (z. B. [44], [46], [50]) durchgeführt wurden.

9.3 Messungen unter Nicht-Referenzbedingungen

9.3.1 Allgemeines

Bei Messung der WASSER-ENERGIEDOSIS unter Nicht-Referenzbedingungen hat in Gleichung (1) der Faktor k_{NR} von eins verschiedene Werte. Bei ELEKTRONENSTRAHLUNG nimmt k_{NR} wegen der Abnahme der Elektronenenergie mit der Tiefe z und des vernachlässigbaren Einflusses der Feldgrößenänderung die folgende Form an:

$$k_{\text{NR}} = \frac{S_{\text{wall}}(z)}{S_{\text{wall}}(z_{\text{ref}})} \cdot \frac{p_{\text{cav}}(z)}{p_{\text{cav}}(z_{\text{ref}})} \cdot \frac{p_{\text{wall}}(z)}{p_{\text{wall}}(z_{\text{ref}})} \quad (18)$$

Für die Abhängigkeit des KORREKTIONSFAKTORS k_{NR} von der Feldgröße F , dem Abstand R vom Zentralstrahl und dem Fokus-Oberflächen-Abstand A liegen keine Werte vor.

9.3.2 Berechnung des KORREKTIONSFAKTORS k_{NR}

Zur Berechnung von $s_{w,a}^{\Delta}(z)$ in Gleichung (18) dient die Beziehung:

$$s_{w,a}^{\Delta}(z) = \frac{a + bx + cx^2 + dy}{1 + ex + fx^2 + gx^3 + hy} \quad (19)$$

wobei $x = \ln(R_{50}/1 \text{ cm})$ und $y = z/R_{50}$ (relative Tiefe in Wasser). Die Werte für die Konstanten lauten

$$\begin{array}{llll} a = 1,075 \ 2 & b = -0,508 \ 67 & c = 0,088 \ 67 & d = -0,084 \ 02 \\ e = -0,428 \ 06 & f = 0,064 \ 63 & g = 0,003 \ 085 & h = -0,124 \ 6 \end{array}$$

ANMERKUNG Die Standardabweichung dieser Anpassungsgleichung an die von Ding et al [8] berechneten Werte für $s_{w,a}^{\Delta}(z)$ beträgt 0,4 %.

Nach Gleichung (19) berechnete Zahlenwerte von $s_{w,a}^{\Delta}(z)$ sind für eine Reihe von R_{50} -Werten von 1 cm bis 20 cm und für Werte der relativen Tiefe z/R_{50} von 0,02 bis 1,2 in Tabelle 10 enthalten.

Nur für die Normungsarbeit

Tabelle 10 — Verhältnis der beschränkten Massen-Stoßbremsvermögen von Wasser zu Luft als Funktion der auf die HALBWERTTIEFE bezogenen Tiefe nach Gleichung (19). Die Tabellenwerte dienen nicht zur Auswertung, sondern zur Veranschaulichung und Kontrolle

z/R_{50}	HALBWERTTIEFE R_{50} in cm																
	1,0	1,5	2,0	2,5	3,0	3,5	4,0	4,5	5,0	5,5	6,0	7,0	8,0	10,0	13,0	16,0	20,0
0,02	1,076	1,056	1,042	1,030	1,020	1,012	1,004	0,997	0,991	0,985	0,980	0,971	0,963	0,950	0,935	0,924	0,914
0,05	1,078	1,058	1,044	1,032	1,022	1,014	1,006	1,000	0,994	0,988	0,983	0,974	0,965	0,952	0,937	0,926	0,916
0,10	1,080	1,061	1,047	1,036	1,026	1,018	1,010	1,004	0,998	0,992	0,987	0,978	0,970	0,957	0,942	0,931	0,920
0,15	1,083	1,064	1,050	1,039	1,030	1,022	1,014	1,008	1,002	0,997	0,992	0,983	0,975	0,961	0,946	0,935	0,924
0,20	1,085	1,067	1,053	1,043	1,034	1,026	1,019	1,012	1,006	1,001	0,996	0,987	0,979	0,966	0,951	0,940	0,929
0,25	1,088	1,070	1,057	1,046	1,037	1,030	1,023	1,017	1,011	1,006	1,001	0,992	0,984	0,971	0,956	0,945	0,933
0,30	1,091	1,073	1,060	1,050	1,041	1,034	1,027	1,021	1,016	1,010	1,006	0,997	0,989	0,976	0,961	0,950	0,938
0,35	1,093	1,076	1,064	1,054	1,045	1,038	1,032	1,026	1,020	1,015	1,011	1,002	0,995	0,982	0,966	0,955	0,943
0,40	1,096	1,079	1,067	1,058	1,049	1,042	1,036	1,030	1,025	1,020	1,016	1,007	1,000	0,987	0,972	0,960	0,948
0,45	1,099	1,083	1,071	1,061	1,054	1,047	1,041	1,035	1,030	1,025	1,021	1,013	1,006	0,993	0,978	0,966	0,953
0,50	1,102	1,086	1,074	1,066	1,058	1,051	1,046	1,040	1,035	1,031	1,026	1,019	1,011	0,999	0,984	0,971	0,959
0,55	1,105	1,089	1,078	1,070	1,062	1,056	1,050	1,045	1,041	1,036	1,032	1,024	1,018	1,005	0,990	0,977	0,964
0,60	1,108	1,093	1,082	1,074	1,067	1,061	1,056	1,051	1,046	1,042	1,038	1,031	1,024	1,012	0,996	0,984	0,970
0,65	1,111	1,096	1,086	1,078	1,071	1,066	1,061	1,056	1,052	1,048	1,044	1,037	1,030	1,018	1,003	0,990	0,976
0,70	1,114	1,100	1,090	1,082	1,076	1,071	1,066	1,062	1,058	1,054	1,050	1,043	1,037	1,025	1,010	0,997	0,983
0,75	1,117	1,103	1,094	1,087	1,081	1,076	1,072	1,067	1,064	1,060	1,057	1,050	1,044	1,033	1,017	1,004	0,989
0,80	1,120	1,107	1,098	1,091	1,086	1,081	1,077	1,073	1,070	1,066	1,063	1,057	1,051	1,040	1,025	1,012	0,996
0,85	1,123	1,110	1,102	1,096	1,091	1,087	1,083	1,079	1,076	1,073	1,070	1,064	1,059	1,048	1,033	1,019	1,004
0,90	1,126	1,114	1,106	1,101	1,096	1,092	1,089	1,086	1,083	1,080	1,077	1,072	1,067	1,056	1,041	1,028	1,011
0,95	1,129	1,118	1,111	1,106	1,102	1,098	1,095	1,092	1,090	1,087	1,085	1,080	1,075	1,065	1,050	1,036	1,019
1,00	1,132	1,122	1,115	1,111	1,107	1,104	1,101	1,099	1,097	1,094	1,092	1,088	1,083	1,074	1,059	1,045	1,028
1,05	1,136	1,126	1,120	1,116	1,113	1,110	1,108	1,106	1,104	1,102	1,100	1,096	1,092	1,083	1,069	1,055	1,037
1,10	1,139	1,130	1,124	1,121	1,118	1,116	1,115	1,113	1,112	1,110	1,108	1,105	1,102	1,093	1,079	1,064	1,046
1,15	1,142	1,134	1,129	1,126	1,124	1,123	1,122	1,120	1,119	1,118	1,117	1,114	1,111	1,104	1,090	1,075	1,056
1,20	1,146	1,138	1,134	1,132	1,130	1,129	1,129	1,128	1,127	1,127	1,126	1,124	1,121	1,115	1,101	1,086	1,066

Mit den Gleichungen (12), (B.7) sowie dem Wert $(s_{w,a}^{\Delta})_{Co} = 1,133$ ergibt sich:

$$s_{w,a}^{\Delta}(z_{ref}) = 1,253 - 0,1487 (R_{50})^{0,214} \quad (20)$$

nach TRS 398 mit R_{50} in cm.

Da die gegenwärtig vorliegenden experimentellen Daten und theoretischen Modelle nicht ausreichen, um für die Tiefenabhängigkeit der in Gleichung (18) auftretenden Störungsfaktoren p_{cav} und p_{wall} von FLACHKAMMERN gesicherte Werte anzugeben, werden diese hier näherungsweise unabhängig von z gleich eins gesetzt. In Gleichung (18) kürzen sich daher die Verhältnisse der Störungsfaktoren p_{cav} und p_{wall} heraus. Für Messungen unter Nicht-Referenzbedingungen sind FLACHKAMMERN zu bevorzugen.

ANMERKUNG Aktuelle experimentelle und theoretische Untersuchungen (z. B. [44], [45]) weisen auf eine Änderung des Störungsfaktors p_{wall} von FLACHKAMMERN mit der Messtiefe hin, die bei niedrigen Elektronenenergien mehrere Prozent betragen kann. Ähnlich scheint es sich mit p_{cav} zu verhalten, auch wenn die Tiefenabhängigkeit hier nicht so ausgeprägt ist. Hier werden in näherer Zukunft genauere Ergebnisse erwartet.

Für KOMPAKTKAMMERN gilt der Hohlraum-Störungsfaktor für die REFERENZTIEFE nach Gleichung (15). Für die Tiefe z ist nach TRS 398 die folgende Beziehung zu verwenden:

$$p_{cav}(z) = 1 - 0,0215 \cdot r \cdot e^{-0,2525 \cdot R_{50} \cdot \left[1 - \frac{z}{1,271 \cdot R_{50} - 0,23} \right]} \quad (21)$$

mit r in mm und R_{50} und z in cm.

Für die Markus-Kammer lautet die tiefenabhängige Beziehung (siehe Anhang B):

$$p_{cav}^{Markus}(z) = \frac{1}{1 + e^{a \cdot \left(\frac{z}{R_{50}} + b + c \cdot R_{50} + d \cdot z \right)}} \quad (22)$$

mit $a = 0,1498$, $b = -21,7336$, $c = -4,3379$ und $d = 4,0487$ sowie z und R_{50} in cm.

9.3.3 Einfluss der FELDGRÖSSE

Die KORREKTIONSFAKTOREN k'_E und k''_E gelten streng genommen nur für Dosismessungen unter REFERENZBEDINGUNGEN nach Tabelle 2. Eine Abhängigkeit dieser Faktoren von der FELDGRÖSSE ist nicht zu erwarten, solange die Energieverteilung in der MESSTIEFE nicht von derjenigen unter REFERENZBEDINGUNGEN abweicht. Bei schmalen Elektronenfeldern, z. B. bei intraoperativer Elektronenbestrahlung, kann sich die tiefenabhängige Energieverteilung infolge der Elektronenstreuung an den Wänden der Elektronenblende zu kleineren Energien hin verschieben. Soweit keine speziellen Berechnungen der Energieverteilung für diesen Fall verfügbar sind, müssen die zu erwartenden Fehler von k'_E und k''_E in das Unsicherheitsbudget einbezogen werden.

Bei Anwendung von ELEKTRONENSTRAHLUNG mit einer von den REFERENZBEDINGUNGEN abweichenden FELDGRÖSSE wird die Messung des zugehörigen Wertes von R_{50} bei unveränderter Energieeinstellung des Beschleunigers unter REFERENZBEDINGUNGEN vorgenommen (siehe 9.1).

10 Messunsicherheitsanalyse

10.1 Allgemeines

Die MESSUNSICHERHEIT der WASSER-ENERGIEDOSIS ist nach DIN V ENV 13005 zu bestimmen, die ausführlich die Grundlagen und Methoden zur Ermittlung der Messunsicherheit beschreibt.

Da die WASSER-ENERGIEDOSIS D nicht direkt gemessen, sondern entsprechend Gleichung (1) aus anderen (Eingangs-)Größen berechnet wird, wird auch die MESSUNSICHERHEIT der WASSER-ENERGIEDOSIS $u(D)$ aus den MESSUNSICHERHEITEN der Eingangsgrößen berechnet. Gleichung (1) ist dabei die Modellgleichung der Unsicherheitsanalyse.

Die erforderlichen MESSUNSICHERHEITEN der Eingangsgrößen können auf zwei verschiedene Arten ermittelt werden, die als Typ A und Typ B bezeichnet werden: Bei einer Ermittlung der MESSUNSICHERHEIT nach Typ A werden der MESSWERT und die STANDARDMESSUNSICHERHEIT durch statistische Analyse einer Reihe unabhängiger Beobachtungen der Größe gewonnen. Der MESSWERT ist in diesem Fall durch den arithmetischen Mittelwert der beobachteten Einzelwerte gegeben, die STANDARDMESSUNSICHERHEIT ist die empirische Standardabweichung des Mittelwertes. Die Ermittlung der MESSUNSICHERHEIT nach Typ B basiert nicht auf einer statistischen Analyse einer Beobachtungsreihe, sondern auf anderen messtechnisch oder wissenschaftlich fundierten Kenntnissen. Solche Kenntnisse sind z. B.:

- Informationen aus früheren Messungen dieser Größe;
- in Kalibrierscheinen oder anderen Zertifikaten angegebene Daten;
- Herstellerspezifikationen;
- Erfahrungen über das Verhalten oder die Eigenschaften relevanter Materialien und Messverfahren;
- in der Literatur angegebene Unsicherheiten für Referenzdaten.

Als Ergebnis der Messunsicherheitsanalyse für die WASSER-ENERGIEDOSIS wird die erweiterte MESSUNSICHERHEIT U angegeben, die sich durch Multiplikation der ermittelten STANDARDMESSUNSICHERHEIT $u(D)$ mit dem Erweiterungsfaktor $k = 2$ ergibt. Dieser Erweiterungsfaktor ist so gewählt, dass die erweiterte MESSUNSICHERHEIT der Halbwerte eines Intervalls entspricht, das einen Bruchteil von etwa 95 % der Werte überdeckt, die der MESSGRÖSSE WASSER-ENERGIEDOSIS vernünftigerweise zugeordnet werden können.

ANMERKUNG Weitergehende Erläuterungen zur Bestimmung der MESSUNSICHERHEIT finden sich in [12], [13], [14], [15].

10.2 MESSUNSICHERHEITEN bei der Ermittlung der WASSER-ENERGIEDOSIS

Die MESSUNSICHERHEIT entsteht durch verschiedene Beiträge wie Unsicherheiten physikalischer Parameter (z. B. Massen-Stoßbremsvermögensverhältnisse, Störungsfaktoren), Unsicherheiten der Kalibrierung des Dosimeters, Unsicherheiten infolge der Dosimeteigenschaften und Unsicherheiten während des Messprozesses.

Diese Unterteilung der bei der Ermittlung der WASSER-ENERGIEDOSIS auftretenden MESSUNSICHERHEITEN nach ihren Quellen zeigt, dass die insgesamt erreichte MESSUNSICHERHEIT der WASSER-ENERGIEDOSIS zu einem Teil von der Auswahl der Messtechnik, der genauen Vorgehensweise bei der Messung und nicht zuletzt vom Aufwand des Anwenders während der Messung abhängt. Es ist deshalb nicht möglich, für die Bestimmung der WASSER-ENERGIEDOSIS ein allgemeingültiges Unsicherheitsbudget anzugeben. Die MESSUNSICHERHEIT muss unter Berücksichtigung der jeweiligen Gegebenheiten ermittelt werden.

Um dies zu erleichtern, werden in 10.4 einige typische Beispiele für Messunsicherheitsbudgets vorgestellt, wie sie mit modernen und zuverlässigen Messmitteln routinemäßig erreicht werden können. Zuvor werden in 10.3 einige Hinweise gegeben, wie die MESSUNSICHERHEITEN der Eingangsgrößen ermittelt werden können, und es wird die Herkunft der in den Beispielen in 10.4 verwendeten Werte der MESSUNSICHERHEITEN erläutert.

In der Praxis empfiehlt es sich, eine untere Grenze für die Größe der im Unsicherheitsbudget berücksichtigten MESSUNSICHERHEITEN zu setzen. Die Erfahrung zeigt, dass die Berücksichtigung von (relativen) MESS-

UNSICHERHEITEN kleiner als 0,1 % im Allgemeinen keinen signifikanten Einfluss auf die MESSUNSICHERHEIT der WASSER-ENERGIEDOSIS hat und daher unterbleiben kann. Trotzdem sollten auch diese vernachlässigten Unsicherheitsbeiträge im Unsicherheitsbudget zumindest erwähnt werden, um zu dokumentieren, dass sie nicht vergessen wurden. Grobe Fehler, wie sie z. B. durch Verwendung unkalibrierter Messgeräte oder durch die Anwendung unkorrekter Messprozeduren entstehen können, werden in den Beispielen nicht berücksichtigt, da sie durch ein geeignetes Qualitätssicherungsprogramm des Anwenders weitgehend vermieden werden können.

10.3 MESSUNSICHERHEITEN der Eingangsgrößen

10.3.1 KALIBRIERFAKTOR N

Die MESSUNSICHERHEIT des KALIBRIERFAKTORS (zum Zeitpunkt der Kalibrierung) ist im Kalibrierschein angegeben, im Allgemeinen als erweiterte MESSUNSICHERHEIT. Der Erweiterungsfaktor k kann dem Kalibrierschein entnommen werden (meist ist $k = 2$). Typische Werte sind hier eine relative erweiterte MESSUNSICHERHEIT von 1,0 % (Erweiterungsfaktor $k = 2$), woraus sich eine relative STANDARDMESSUNSICHERHEIT von 0,50 % ergibt.

Wird zu einem späteren Zeitpunkt gemessen, muss eine zusätzliche MESSUNSICHERHEIT durch eine mögliche Änderung des KALIBRIERFAKTORS seit der Kalibrierung berücksichtigt werden. Typischerweise ändert sich der KALIBRIERFAKTOR eines Dosimeters über einen Zeitraum von mehreren Jahren (zwischen zwei Kalibrierungen) um höchstens 0,3 %. Nimmt man diesen Wert als Grenze einer rechteckigen Wahrscheinlichkeitsverteilung (Erweiterungsfaktor $k = 1,73$) an, dann erhält man daraus die relative STANDARDMESSUNSICHERHEIT 0,173 %.

10.3.2 Um die Nullanzeige M_0 verminderte ANZEIGE M des Dosimeters

Nach Erreichen eines stabilen Zustandes kann mehrfach die ANZEIGE M ermittelt werden (mindestens zehnmal) und daraus die Typ-A-Messunsicherheit (Standardabweichung des Mittelwertes) bestimmt werden. Die relative MESSUNSICHERHEIT für die ANZEIGE des Dosimeters beträgt z. B. für STRAHLUNGSFELDER eines Beschleunigers etwa 0,5 %.

Die Nullanzeige M_0 , die typischerweise weniger als 0,1 % der ANZEIGE M (bei eingeschalteter Strahlung) beträgt, kann oftmals vernachlässigt werden bzw. in Form einer zusätzlichen Unsicherheit der ANZEIGE M berücksichtigt werden.

10.3.3 Korrektur für den Einfluss der Luftdichte k_p

Der KORREKTIONSFAKTOR k_p wird nach Gleichung (2) aus gemessenen Werten des Luftdrucks p und der Temperatur T im Luftvolumen der Kammer berechnet. Bei Verwendung eines kalibrierten Barometers, das sich in derselben Höhe wie die IONISATIONSKAMMER befindet, kann der Luftdruck typischerweise mit einer relativen STANDARDMESSUNSICHERHEIT von 0,1 % bestimmt werden (MESSUNSICHERHEIT ist im Kalibrierschein des Barometers angegeben).

Die Lufttemperatur im Kammerinnenraum wird üblicherweise nicht direkt gemessen, sondern es wird die Wasser-Temperatur im PHANTOM (in der Nähe der IONISATIONSKAMMER) bestimmt. Unter der Annahme von Temperatursgleichung kann die Temperatur mit einer STANDARDMESSUNSICHERHEIT von etwa 0,5 K bestimmt werden; bei einer Temperatur von etwa 293 K entspricht dies einer relativen STANDARDMESSUNSICHERHEIT von 0,17 %.

10.3.4 Korrektur für den Einfluss der Luftfeuchte k_h

Im Bereich zwischen 30 % und 75 % relativer Luftfeuchte ändert sich das ANSPRECHVERMÖGEN einer IONISATIONSKAMMER typischerweise um nicht mehr als 0,1 %. Der Einfluss der Luftfeuchte wird daher üblicherweise nicht korrigiert (d. h. $k_h = 1$), er sollte aber im Unsicherheitsbudget berücksichtigt werden, indem k_h eine Unsicherheit zugeordnet wird, die der möglichen Änderung des ANSPRECHVERMÖGENS entspricht (z. B. rechteckige Verteilung mit Halbbreite 0,1 %, $k = 1,73$).

10.3.5 Korrektur für den Einfluss der unvollständigen Sättigung k_s

Bei Verwendung der Gleichung (3) zur Berechnung des KORREKTIONSFAKTORS k_s beträgt die STANDARDMESSUNSICHERHEIT typischerweise 0,1 %.

10.3.6 Korrektur für den Einfluss der Polarität der Kammerspannung k_p

Die relative STANDARDMESSUNSICHERHEIT des KORREKTIONSFAKTORS k_p beträgt typischerweise 0,1 %. Insbesondere muss darauf geachtet werden, dass nach dem Umpolen der Kammerspannung erst dann die ANZEIGE bestimmt wird, nachdem sich ein stationärer Wert eingestellt hat.

10.3.7 Korrektur für andere Temperatureffekte als die Änderung der Luftdichte k_T

In der Regel ist nicht bekannt, wie das ANSPRECHVERMÖGEN des Dosimeters (nach Korrektur des Einflusses der Luftdichte) von der Temperatur abhängt — für den KORREKTIONSFAKTOR k_T wird daher meist der Wert 1 angenommen. Für eine Abschätzung können die Anforderungen von DIN EN 60731:2006-09 zugrunde gelegt werden, wonach sich das ANSPRECHVERMÖGEN eines Dosimeters bei Temperaturänderung im NENN-GEBRAUCHSBEREICH (mindestens 15 °C bis 35 °C) um nicht mehr als 1 % ändern darf. Nimmt man an, dass die Temperatur während der Messung höchstens im Bereich von 18 °C bis 22 °C variiert (Klimatisierung des BESTRAHLUNGSRUAUMES), dann beträgt die Änderung des ANSPRECHVERMÖGENS des Dosimeters (unter der Annahme einer linearen Änderung des ANSPRECHVERMÖGENS mit der Temperatur) $\pm 0,1$ % (bezogen auf das Ansprechvermögen bei 20 °C). Nimmt man diesen Wert als groben Schätzwert für die Breite einer die MESSUNSICHERHEIT von k_T beschreibenden Rechteckverteilung (Erweiterungsfaktor $k = 1,73$), dann ergibt sich eine relative STANDARDMESSUNSICHERHEIT von 0,058 %.

10.3.8 Korrektur für die Abweichung von REFERENZBEDINGUNGEN k_{NR}

Bei Messungen unter REFERENZBEDINGUNGEN hat der KORREKTIONSFAKTOR k_{NR} den Wert 1. Allerdings sind die bei der Messung tatsächlich vorhandenen Werte der Feldgröße, der Tiefe im Phantom oder des Fokus-Oberflächen-Abstandes mit Unsicherheiten behaftet, die letztlich zur Messunsicherheit der Wasser-Energiedosis beitragen.

Die Feldgröße beeinflusst die spektrale Verteilung und die Richtungsverteilung der Strahlung. Der Einfluss der Feldgröße kann jedoch üblicherweise vernachlässigt werden, solange diese nur wenig (d. h. höchstens 1 cm) von der Referenzfeldgröße abweicht. Andernfalls sollte der Einfluss der Feldgröße experimentell untersucht und im Unsicherheitsbudget berücksichtigt werden. Falls keine experimentellen Daten vorliegen, können zur Abschätzung des durch die Feldgröße verursachten Messunsicherheitsbeitrags auch tabellierte Daten aus der Literatur herangezogen werden.

Die Positionierung der Kammer im Phantom (in der REFERENZTIEFE) ist mit einer Unsicherheit behaftet, die von den bei der Positionierung verwendeten Hilfsmitteln und Verfahren abhängt und typischerweise etwa 0,2 mm beträgt. Der sich daraus ergebende Unsicherheitsbeitrag zur Dosismessung kann abgeschätzt werden, indem die Unsicherheit der Tiefenpositionierung im Phantom mit dem relativen Anstieg der Tiefendosis-Kurve multipliziert wird. So beträgt z. B. im ^{60}Co -Strahlungsfeld (unter Bezugsbedingungen) die relative Änderung der Dosis mit der Tiefe $0,006 \text{ mm}^{-1}$. Einer Unsicherheit der Tiefenpositionierung von 0,2 mm entspricht somit ein relativer Unsicherheitsbeitrag zur Dosismessung von 0,12 %. In hochenergetischen Photonen- und Elektronenstrahlungsfeldern sollte der relative Anstieg der Tiefendosis-Kurve (in der Nähe der REFERENZTIEFE) zur Abschätzung des Unsicherheitsbeitrags der Tiefenpositionierung experimentell bestimmt werden. Falls keine experimentellen Daten vorliegen, können ersatzweise auch tabellierte Daten aus der Literatur verwendet werden.

ANMERKUNG Solche Daten, die den Einfluss der Feldgröße, des Fokus-Oberflächen-Abstandes oder der Tiefe im Phantom beschreiben, sind z. B. in [43]) angegeben.

Bei Messungen unter Nicht-Referenzbedingungen hat der KORREKTIONSFAKTOR k_{NR} einen von 1 abweichenden Wert. Zusätzlich zu den Unsicherheitsbeiträgen in Folge einer ungenauen Einstellung der Feldgröße oder einer ungenauen Kammerpositionierung (die hier natürlich ebenfalls auftreten und auf analoge Weise abgeschätzt werden können), ist eine zusätzliche Unsicherheit zu berücksichtigen, die der Tatsache Rechnung

trägt, dass die Werte des KORREKTIONSFAKTORS k_{NR} bei Abweichung von den REFERENZBEDINGUNGEN (z. B. in anderen Messtiefen) weniger genau bekannt sind. Hier kann keine allgemeine Abschätzung des zu erwartenden Unsicherheitsbeitrages gegeben werden; es müssen jeweils Betrachtungen zu dem konkreten Einzelfall angestellt werden.

10.3.9 Korrektur für den Einfluss der STRAHLUNGSQUALITÄT der PHOTONENSTRAHLUNG k_Q

Die relative STANDARDMESSUNSICHERHEIT der in dieser Norm angegebenen Werte des KORREKTIONSFAKTORS k_Q beträgt 1,0 %.

10.3.10 Korrektur für den Einfluss der STRAHLUNGSQUALITÄT der ELEKTRONENSTRAHLUNG k_E

- a) Messung mit KOMPAKTKAMMERN: Die relative STANDARDMESSUNSICHERHEIT der in dieser Norm angegebenen Werte des KORREKTIONSFAKTORS k_E für KOMPAKTKAMMERN beträgt 1,2 %.
- b) Messung mit FLACHKAMMERN: Die relative STANDARDMESSUNSICHERHEIT der in Tabelle 9 angegebenen Werte des KORREKTIONSFAKTORS k_E für FLACHKAMMERN beträgt
- für die Kammern des Herstellers PTW: 1,3 %;
 - für die Kammern des Herstellers Scdx-Wellhöfer: 1,4 %.

10.4 Beispiele des Messunsicherheitsbudgets für Messungen der WASSER-ENERGIEDOSIS unter REFERENZBEDINGUNGEN

In den Tabellen 11 bis 13 sind Beispiele für Messunsicherheitsbudgets angegeben.

Tabelle 11 — Messunsicherheitsbudget für die Dosimetrie hochenergetischer PHOTONENSTRAHLUNG aus Beschleunigern mit KOMPAKTKAMMERN

Nr.	EINFLUSSGRÖSSE X_i , Quelle der Unsicherheit	Relative erweiterte MESS- UNSICHERHEIT	Erweiterungs- faktor	Relative Standard- Mess- unsicherheit
1	KALIBRIERFAKTOR N			
1.1	Im Kalibrierschein angegebene MESSUNSICHERHEIT	1,00 %	2	0,500 %
1.2	Stabilität des KALIBRIERFAKTORS (Alterung)	0,30 %	1,73	0,173 %
2	ANZEIGE des Dosimeters ($M - M_0$)			
2.1	Unsicherheit der (separaten) Elektrometerkalibrierung	0,00 %	1	0,000 %
2.2	Typ-A-Unsicherheit des Mittelwertes (zufällige Effekte)	0,50 %	1	0,500 %
2.3	Endliche Auflösung des Messgerätes	0,10 %	1,73	0,058 %
3	Luftdichtekorrektur k_p			
3.1	Unsicherheit der Barometerkalibrierung	0,10 %	1	0,100 %
3.2	Änderung des Luftdrucks während der Messung	0,00 %	1	0,000 %
3.3	Unsicherheit der Thermometerkalibrierung	0,17 %	1	0,171 %
3.4	Änderung der Temperatur während der Messung	0,00 %	1	0,000 %
3.5	Abweichung zwischen gemessener Temperatur und Temperatur im Kammervolumen	0,00 %	1	0,000 %
4	Luftfeuchtekorrektur k_h			
4.1	Abweichung der Luftfeuchte von BEZUGSWERT 50 % relativer Feuchte	0,10 %	1,73	0,058 %

Tabelle 11 (fortgesetzt)

Nr.	EINFLUSSGRÖSSE X_i , Quelle der Unsicherheit	Relative erweiterte MESS- UNSICHERHEIT	Erweiterungs- faktor	Relative Standard- Mess- unsicherheit
5	Korrektur für unvollständige Sättigung k_S			
5.1	Unsicherheit des berechneten KORREKTIONSFAKTORS k_S	0,10 %	1	0,100 %
6	Polaritätskorrektur k_p			
6.1	Unsicherheit des KORREKTIONSFAKTORS k_p	0,10 %		0,100 %
7	Korrektur für weitere Temperatureinflüsse (außer auf Luftdichte) k_T			
7.1	Unsicherheit des KORREKTIONSFAKTORS k_T	0,10 %	1,73	0,058 %
8	Korrektur für die Abweichung von REFERENZBEDINGUNGEN k_{NR}			
8.1	Abweichung der FELDGRÖSSE vom Referenzwert	0,00 %	1	0,000 %
8.2	Unsicherheit durch ungenaue Tiefenpositionierung	0,12 %	1	0,120 %
8.3	Unsicherheit des Tiefenverlaufs von k_{NR}	0,00 %	1	0,000 %
9	Korrektur des Einflusses der STRAHLUNGSQUALITÄT k_Q			
9.1	Unsicherheit des KORREKTIONSFAKTORS k_Q	1,00 %	1	1,000 %

Aus den in der letzten Spalte der Tabelle 11 angegebenen relativen STANDARDMESSUNSICHERHEITEN der EINFLUSSGRÖSSEN erhält man die relative STANDARDMESSUNSICHERHEIT der WASSER-ENERGIEDOSIS $u(D)/D = 1,27$ %. Die relative erweiterte MESSUNSICHERHEIT beträgt $U = 2,6$ %. Die angegebene erweiterte MESSUNSICHERHEIT ist das Produkt der STANDARDMESSUNSICHERHEIT und dem Erweiterungsfaktor $k = 2$. Sie entspricht bei einer Normalverteilung einer Überdeckungswahrscheinlichkeit von etwa 95 %.

Tabelle 12 — Messunsicherheitsbudget für die Dosimetrie hochenergetischer ELEKTRONENSTRAHLUNG mit KOMPAKTKAMMERN

Nr.	EINFLUSSGRÖSSE X_i , Quelle der Unsicherheit	Relative erweiterte MESS- UNSICHERHEIT	Erweiterungs- faktor	Relative Standard- Mess- unsicherheit
1	KALIBRIERFAKTOR N			
1.1	Im Kalibrierschein angegebene MESSUNSICHERHEIT	1,00 %	2	0,500 %
1.2	Stabilität des KALIBRIERFAKTORS (Alterung)	0,30 %	1,73	0,173 %
2	ANZEIGE des Dosimeters ($M - M_0$)			
2.1	Unsicherheit der (separaten) Elektrometerkalibrierung	0,00 %	1	0,000 %
2.2	Typ-A-Unsicherheit des Mittelwertes (zufällige Effekte)	0,50 %	1	0,500 %
2.3	endliche Auflösung des Messgerätes	0,10 %	1,73	0,058 %
3	Luftdichtekorrektur k_p			
3.1	Unsicherheit der Barometerkalibrierung	0,10 %	1	0,100 %
3.2	Änderung des Luftdrucks während der Messung	0,00 %	1	0,000 %
3.3	Unsicherheit der Thermometerkalibrierung	0,17 %	1	0,171 %
3.4	Änderung der Temperatur während der Messung	0,00 %	1	0,000 %
3.5	Abweichung zwischen gemessener Temperatur und Temperatur im Kammervolumen	0,00 %	1	0,000 %

Tabelle 12 (fortgesetzt)

Nr.	EINFLUSSGRÖSSE X_i , Quelle der Unsicherheit	Relative erweiterte MESS- UNSICHERHEIT	Erweiterungs- faktor	Relative Standard- Mess- unsicherheit
4	Luftfeuchtekorrektur k_h			
4.1	Abweichung der Luftfeuchte von BEZUGSWERT 50 % relativer Feuchte	0,10 %	1,73	0,058 %
5	Korrektur für unvollständige Sättigung k_s			
5.1	Unsicherheit des berechneten KORREKTIONSAKTORS k_s	0,10 %	1	0,100 %
6	Polaritätskorrektur k_p			
6.1	Unsicherheit des KORREKTIONSAKTORS k_p	0,10 %	1	0,100 %
7	Korrektur für weitere Temperatureinflüsse (außer auf Luftdichte) k_T			
7.1	Unsicherheit des KORREKTIONSAKTORS k_T	0,10 %	1,73	0,058 %
8	Korrektur für die Abweichung von REFERENZBEDINGUNGEN k_{NR}			
8.1	Abweichung der FELDGRÖSSE vom Referenzwert	0,00 %	1	0,000 %
8.2	Unsicherheit durch ungenaue Tiefenpositionierung	0,18 %	1	0,180 %
8.3	Unsicherheit des Tiefenverlaufs von k_{NR}	0,00 %	1	0,000 %
9	Korrektur des Einflusses der STRAHLUNGSQUALITÄT k_E			
9.1	Unsicherheit des KORREKTIONSAKTORS k_E	1,20 %	1	1,200 %

Aus den in der letzten Spalte der Tabelle 12 angegebenen relativen STANDARDMESSUNSICHERHEITEN der EINFLUSSGRÖSSEN erhält man die relative STANDARDMESSUNSICHERHEIT der WASSER-ENERGIEDOSIS $u(D)/D = 1,45 \%$. Die relative erweiterte MESSUNSICHERHEIT beträgt $U = 2,9 \%$. Die angegebene erweiterte MESSUNSICHERHEIT ist das Produkt der STANDARDMESSUNSICHERHEIT und dem Erweiterungsfaktor $k = 2$. Sie entspricht bei einer Normalverteilung einer Überdeckungswahrscheinlichkeit von etwa 95 %.

Tabelle 13 — Messunsicherheitsbudget für die Dosimetrie hochenergetischer ELEKTRONENSTRAHLUNG mit FLACHKAMMERN

Nr.	EINFLUSSGRÖSSE X_i , Quelle der Unsicherheit	Relative erweiterte MESS- UNSICHERHEIT	Erweiterungs- faktor	Relative Standard- Mess- unsicherheit
1	KALIBRIERFAKTOR N			
1.1	im Kalibrierschein angegebene MESSUNSICHERHEIT	1,00 %	2	0,500 %
1.2	Stabilität des KALIBRIERFAKTORS (Alterung)	0,30 %	1,73	0,173 %
2	ANZEIGE des Dosimeters ($M - M_0$)			
2.1	Unsicherheit der (separaten) Elektrometerkalibrierung	0,00 %		0,000 %
2.2	Typ-A-Unsicherheit des Mittelwertes (zufällige Effekte)	0,50 %	1	0,500 %
2.3	endliche Auflösung des Messgerätes	0,10 %	1,73	0,058 %
3	Luftdichtekorrektur k_p			
3.1	Unsicherheit der Barometerkalibrierung	0,10 %	1	0,100 %
3.2	Änderung des Luftdrucks während der Messung	0,00 %	1	0,000 %
3.3	Unsicherheit der Thermometerkalibrierung	0,47 %	1	0,171 %
3.4	Änderung der Temperatur während der Messung	0,00 %	1	0,000 %
3.5	Abweichung zwischen gemessener Temperatur und Temperatur im Kammervolumen	0,00 %	1	0,000 %
4	Luftfeuchtekorrektur k_h			
4.1	Abweichung der Luftfeuchte von BEZUGSWERT 50 % relativer Feuchte	0,10 %	1,73	0,058 %
5	Korrektur für unvollständige Sättigung k_s			
5.1	Unsicherheit des berechneten KORREKTIONSFAKTORS k_s	0,10 %	1	0,100 %
6	Polaritätskorrektur k_p			
6.1	Unsicherheit des KORREKTIONSFAKTORS k_p	0,10 %	1	0,100 %
7	Korrektur für weitere Temperatureinflüsse (außer auf Luftdichte) k_T			
7.1	Unsicherheit des KORREKTIONSFAKTORS k_T	0,10 %	1,73	0,058 %
8	Korrektur für die Abweichung von REFERENZBEDINGUNGEN k_{NR}			
8.1	Abweichung der FELDGRÖSSE vom Referenzwert	0,00 %	1	0,000 %
8.2	Unsicherheit durch ungenaue Tiefenpositionierung	0,18 %	1	0,180 %
8.3	Unsicherheit des Tiefenverlaufs von k_{NR}	0,00 %	1	0,000 %
9	Korrektur des Einflusses der STRAHLUNGSQUALITÄT k_E			
9.1	Unsicherheit des KORREKTIONSFAKTORS k_E	1,30 %	1	1,350 %

Aus den in der letzten Spalte der Tabelle 13 angegebenen relativen STANDARDMESSUNSICHERHEITEN der EINFLUSSGRÖSSEN erhält man die relative STANDARDMESSUNSICHERHEIT der WASSER-ENERGIEDOSIS $u(D)/D = 1,53$ %. Die relative erweiterte MESSUNSICHERHEIT beträgt $U = 3,1$ %. Die angegebene erweiterte MESSUNSICHERHEIT ist das Produkt der STANDARDMESSUNSICHERHEIT und dem Erweiterungsfaktor $k = 2$. Sie entspricht bei einer Normalverteilung einer Überdeckungswahrscheinlichkeit von etwa 95 %.

Anhang A (normativ)

Korrektion der unvollständigen Sättigung

A.1 Experimentelle Bestimmung des KORREKTIONSFAKTORS k_s

In der Regel besteht zwischen dem Kehrwert der auf die DOSIS bezogenen ANZEIGE des Dosimeters und dem Kehrwert der angelegten Kammerspannung $1/U$ (bei gepulster Strahlung) oder dem Kehrwert des Quadrats der Kammerspannung $1/U^2$ (bei kontinuierlicher Strahlung) in einem bestimmten Spannungsbereich ein linearer Zusammenhang. Außerhalb dieses Spannungsbereiches sollte eine IONISATIONSKAMMER nicht betrieben werden, um eine Verfälschung des Messsignals durch nicht von der Dosisleistung abhängige Effekte zu vermeiden.

Zur Ermittlung des KORREKTIONSFAKTORS k_s wird für die zu untersuchende Dosisleistung oder DOSIS je Puls die ANZEIGE des Dosimeters M bei verschiedenen Kammerspannungen U bestimmt. Vor der Messung mit einer neu eingestellten Kammerspannung bzw. geänderter Polarität ist die Anlaufzeit der IONISATIONSKAMMER abzuwarten. In der Regel empfiehlt sich eine Vorbestrahlung mit jeweils etwa 1 Gy. Die ANZEIGE M ist bezüglich des Polaritätseffekts und ggf. des Einflusses der Luftdichte zu korrigieren. Einzelheiten über die IONISATIONSKAMMER sind der Gebrauchsanleitung zu entnehmen.

ANMERKUNG Nähere Einzelheiten, siehe TRS 398, [16], [17], [18], [19], [20].

Bei kontinuierlicher Strahlung trägt man die Kehrwerte der ANZEIGEN $1/M$ bei niedriger Dosisleistung als Funktion von $1/U$, bei hohen Dosisleistungen (ab etwa 10 Gy/min) als Funktion von $1/U^2$ auf, bei gepulster Strahlung als Funktion von $1/U$ (Jaffé-Diagramm). Die Kammerspannung wird dabei zwischen der laut Gebrauchsanleitung zur IONISATIONSKAMMER maximal erlaubten Spannung und einem Drittel dieses Werts variiert. Es sollten keine kleineren Spannungen verwendet werden als die Untergrenze des vom HERSTELLER angegebenen NENNGBRAUCHSBEREICHES. Die Punkte des Jaffé-Diagramms repräsentieren die Kehrwerte der Mittelwerte der bei positiver und negativer Kammerspannung erhaltenen MESSWERTE. Der Kurvenverlauf hängt von der Bauart der IONISATIONSKAMMER und von der Dosisleistung (kontinuierliche Strahlung) bzw. DOSIS je Puls (gepulste Strahlung) ab. Deshalb ist die jeweilige Kammer bei den im klinischen Betrieb verwendeten Dosisleistungen bzw. DOSEN je Puls zu untersuchen, wobei kleine Werte der Dosisleistung bzw. der DOSIS je Puls bezüglich des linearen Bereichs des Jaffé-Diagramms bei höheren Spannungen die kritischere Situation darstellen. In der Regel ergibt sich ein Spannungsbereich, in dem die Messpunkte durch eine Gerade approximiert werden können (siehe Bild A.1). Um den Einfluss der Dosisleistungsschwankungen des Beschleunigers zu minimieren, sollte die ANZEIGE M mithilfe eines externen Monitors korrigiert werden. Dazu sollte vorzugsweise eine offene Ionisationskammer im PHANTOM, in der MESSTIEFE und etwa 4 cm von der Messkammer entfernt positioniert werden. In diesem Falle ist die Luftdichtekorrektion in Gleichung (A.1) nicht erforderlich. Bei Verwendung einer geschlossenen Ionisationskammer als Monitor ist der Luftdichte-KORREKTIONSFAKTOR k_p anzuwenden.

Bei linearem Verlauf des Jaffé-Diagramms wird k_s durch Extrapolation auf Kammerspannung unendlich ermittelt:

$$k_s = \frac{M_s}{(M - M_0)k_p} \quad (\text{A.1})$$

Dabei ist

- M_s die zur Kammerspannung unendlich (d. h. $1/U = 0$ bzw. $1/U^2 = 0$) gehörende ANZEIGE, d. h. der Wert bei vollständiger Sättigung,
- M die ANZEIGE, die man für die üblicherweise benutzte Kammerspannung erhält;
- M_0 die Nullanzeige,
- k_p der Korrektionsfaktor für den Einfluss der Luftdichte (siehe 7.1),
- k_P der Korrektionsfaktor für den Einfluss der Polarität der Kammerspannung (siehe 7.4).

Die Kammer soll bei Messungen immer mit Spannungen innerhalb des linearen Bereichs des Jaffé-Diagramms betrieben werden. In diesem Falle kann auch die „Zwei-Spannungen-Methode“ angewendet werden:

$$k_s = \frac{\frac{U_1}{U_2} - 1}{\frac{U_1}{U_2} \left[\frac{(M - M_0) k_p k_p}{(M - M_0) k_p k_p} \right]_1 - \frac{U_2}{U_2} \left[\frac{(M - M_0) k_p k_p}{(M - M_0) k_p k_p} \right]_2} \quad (\text{A.2})$$

Dabei sind

- U_1 die übliche Kammerspannung,
- U_2 die variierte Kammerspannung ($U_1/U_2 \geq 3$),
- M die ANZEIGE,
- M_0 die Nullanzeige,
- k_p der Korrektionsfaktor für den Einfluss der Luftdichte (siehe 7.1),
- k_p der Korrektionsfaktor für den Einfluss der Polarität der Kammerspannung (siehe 7.4).

Ergibt sich kein Spannungsbereich, in dem die Messpunkte durch eine Gerade approximiert werden können, und ist die Ursache für die Abweichung von der Linearität nicht bekannt, so kann eine Sättigungskorrektur nicht durchgeführt werden.

Im Messunsicherheitsbudget ist die Unsicherheit der Extrapolation auf vollständige Sättigung anzusetzen.

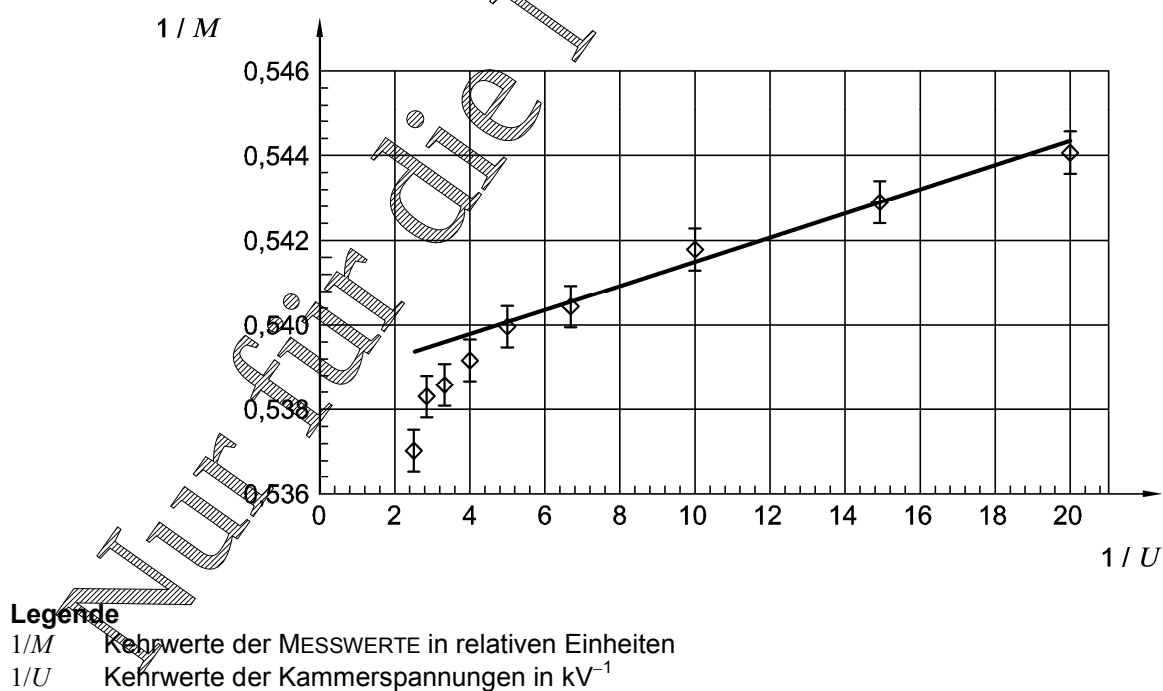


Bild A.1 — Beispiel eines Jaffé-Diagramms einer FLACHKAMMER. Aufgetragen sind die Kehrwerte der Mittelwerte der bei positiver und negativer Kammerspannung erhaltenen MESSWERTE gegen die Kehrwerte der Kammerspannung. Der lineare Bereich erstreckt sich etwa von 50 V bis 200 V (aus [4])

A.2 Bestimmung des KORREKTIONSFAKTORS k_s für ausgewählte IONISATIONSKAMMERN

Der Sättigungsgrad f einer IONISATIONSKAMMER beträgt bei kontinuierlicher bzw. gepulster Strahlung:

- bezüglich der Anfangsrekombination, die durch Rekombination der erzeugten Ladungsträger längs der Bahn eines geladenen Teilchens erzeugt wird

$$f_A = 1 - E_i \cdot \frac{d}{U} \quad (\text{A.3})$$

- bezüglich der Verluste durch Diffusion, durch die ein Teil der Ladungsträger gegen die Richtung des angelegten elektrischen Feldes zur entgegengesetzten Elektrode gelangt

$$f_D = 1 - \frac{2 \cdot k_B \cdot T}{e \cdot U} \quad (\text{A.4})$$

- bezüglich der Volumenrekombination, die durch Diffusion und elektrostatische Anziehung der im Ionisationsvolumen homogen verteilten Ladungsträger entsteht, für kontinuierliche Strahlung

$$f_V = 1 - \varphi \cdot \frac{\dot{D}_a \cdot d^4}{U^2} \quad (\text{A.5})$$

und für gepulste Strahlung

$$f_V = 1 - \frac{\mu}{2} \cdot \frac{q \cdot d^2}{U} = 1 - \frac{\mu}{2} \cdot \frac{\rho}{W/e} \cdot \frac{D_a^p \cdot d^2}{U} \quad (\text{A.6})$$

$$\text{mit } D_a^p = q \cdot \frac{W/e}{\rho}.$$

Dabei ist

U die Kammerspannung, in V;

$\dot{D}_a$ die Energiedosisleistung in Luft der kontinuierlichen Strahlung, in mGy/min;

D_a^p die ENERGIEDOSIS je Puls in Luft bei gepulster Strahlung, in mGy;

E_i die Konstante, mit der Dimension einer Feldstärke;

φ die Konstante, abhängig von den Eigenschaften des Kammermaterials;

μ der Faktor, der von der Geometrie der IONISATIONSKAMMER, von der Beweglichkeit der Ladungsträger und vom Rekombinationskoeffizienten abhängt;

ANMERKUNG Ein typischer Wert ist $\mu = 3,02 \cdot 10^{10} \text{ Vm/C}$ [17].

T die absolute Luft-Temperatur, in K;

k_B die Boltzmann-Konstante ($k_B = 1,380\,658 \cdot 10^{-23} \text{ JK}^{-1}$);

e die Elementarladung ($e = 1,602\,177 \cdot 10^{-19} \text{ C}$);

q die erzeugte Ladungsdichte von Ionen je Puls eines Vorzeichens, in $\text{C} \cdot \text{m}^{-3}$;

ρ die Luftdichte ($\rho = 1,204 \text{ kg/m}^3$, bei 293,15 K und 101,325 kPa);

W/e die Ionisierungskonstante von Luft ($W/e = 33,97 \text{ J/C}$);

d der Elektrodenabstand einer FLACHKAMMER bzw. ein effektiver Abstand für KOMPAKTKAMMERN, in mm.

Für zylindrische und sphärische Kammern ist d zu ersetzen durch:

$$d_{\text{zyl}} = \left[\frac{r_a^2 - r_i^2}{2} \cdot \ln \left(\frac{r_a}{r_i} \right) \right]^{\frac{1}{2}} \quad (\text{A.7})$$

bzw.

$$d_{\text{sph}} = (r_a - r_i) \cdot \left[\frac{1}{3} \cdot \left(1 + \frac{r_a}{r_i} + \frac{r_i}{r_a} \right) \right]^{\frac{1}{2}} \quad (\text{A.8})$$

Hierbei ist r_a der Radius der äußeren Elektrode, r_i ist der Radius der inneren Elektrode, in mm.

Für Fingerhutkammern berechnet sich d durch Gewichtung mit den Volumenanteilen des zylindrischen (w_1) und des (näherungsweise) sphärischen (w_2) Teils der IONISATIONSKAMMER:

$$d_{\text{Fingerhut}} = (w_1 \cdot d_{\text{zyl}}^2 + w_2 \cdot d_{\text{sph}}^2)^{\frac{1}{2}} \quad (\text{A.9})$$

Im Allgemeinen treten alle drei Rekombinationsmechanismen gemeinsam auf, der Sättigungsgrad ist dann das Produkt der Sättigungsgrade aufgrund der einzelnen Mechanismen. Demnach ist der KORREKTIONSFAKTOR k_s für die insgesamt auftretende Rekombination:

$$k_s = \frac{1}{f_A \cdot f_D \cdot f_V} \quad (\text{A.10})$$

Nahe der Sättigung ergibt sich näherungsweise für kontinuierliche Strahlung:

$$k_s = 1 + \frac{E_i \cdot d + 2 \cdot k_B \cdot T / e}{U} + \frac{\varphi \cdot \dot{D}_a \cdot d^4}{U^2} \quad (\text{A.11})$$

Bei den in der Strahlentherapie oder der Kalibrierung von IONISATIONSKAMMERN in (kontinuierlichen) ^{60}Co -Strahlungsfeldern vorkommenden Dosisleistungen von etwa 1 Gy/min kann der quadratische Term in Gleichung (A.11) (Volumenrekombination) vernachlässigt werden. Man erwartet daher bei kontinuierlicher Strahlung niedriger Dosisleistung eine (annähernd) lineare Abhängigkeit des Kehrwertes $1/M$ der Anzeige vom Kehrwert $1/U$ der Kammer-spannung. Hierbei sind Abweichungen von der Linearität bei kleinen Kammer-spannungen (d. h. großem $1/U$) möglich. Die Bestimmung des KORREKTIONSFAKTORS k_s kann in diesem Fall analog zur Vorgehensweise bei gepulster Strahlung durch Bestimmung des Sättigungswertes der ANZEIGE M_s mittels linearer Interpolation auf den Wert $1/U = 0$ erfolgen (Gleichung (A.1)).

Bei sehr hohen Dosisleistungen oder kleinen Kammer-spannungen, bei denen die Volumenrekombination (quadratischer Term in Gleichung (A.11)) dominiert, stellt man die Kehrwerte der ANZEIGEN $1/M$ in Abhängigkeit vom Quadrat des Kehrwertes $1/U^2$ der Kammer-spannung dar. In der Regel ergibt sich auch hier ein Spannungsbereich, in dem die Messpunkte durch eine Gerade approximiert werden können, woraus sich die Sättigungsanzeige M_s durch lineare Extrapolation auf $1/U^2 = 0$ ergibt. Der KORREKTIONSFAKTOR k_s wird dann nach Gleichung (A.1) ermittelt.

Für gepulste Strahlung ergibt sich die Korrektur nahe der Sättigung näherungsweise zu:

$$k_s = 1 + \frac{E_i \cdot d + 2 \cdot k_B \cdot T / e + \frac{\mu \cdot d^2 \cdot \rho}{2 \cdot W / e} \cdot \dot{D}_a^p}{U} \quad (\text{A.12})$$

Gleichung (A.12) stellt eine Geradengleichung der folgenden Form dar:

$$k_s = 1 + \frac{\gamma + \delta \cdot D^p}{U} \quad (\text{A.13})$$

Die in Tabelle 4 angegebenen Koeffizienten γ und δ gelten für die WASSER-ENERGIEDOSIS D^p je Puls, angegeben in mGy. Diese wird aus der Pulswiederholfrequenz ν und der WASSER-ENERGIEDOSISLEISTUNG $\dot{D}$ in Gy/min des Beschleunigers bestimmt.

Der Parameter γ berücksichtigt Verluste aufgrund der Anfangsrekombination und Diffusion, der Parameter δ berücksichtigt die Volumenrekombination. Beide Parameter sind aus Messungen von Jaffé-Diagrammen für verschiedene Werte der WASSER-ENERGIEDOSIS je Puls (D^p) für eine Reihe typischer KOMPAKT- und FLACH-KAMMERN experimentell bestimmt worden. Für einen Wertebereich für die WASSER-ENERGIEDOSIS je Puls und für Kammeranspannungen, die im linearen Bereich des Jaffé-Diagramms liegen, sind diese Werte in Tabelle 4 angegeben. Weiterhin gelten die Koeffizienten für den Fall, dass $\nu < 1/\tau$. Dabei sind ν die Pulswiederholfrequenz und τ die IONENSAMMELZEIT.

Es gilt:

$$\tau = \frac{d^2}{U \cdot c} \quad (\text{A.14})$$

mit

c Ionenbeweglichkeit der langsamsten Ionen; $c_{\text{Luft}} = 1,5 \text{ cm}^2 \text{ V}^{-1} \text{ s}^{-1}$.

Mit den Tabellenwerten für γ und δ können die Koeffizienten für die eingestellte Kammeranspannung berechnet werden. Diese sind unter den folgenden Voraussetzungen anwendbar:

- die Betriebsspannung U der IONISATIONSKAMMER muss im linearen Bereich des Jaffé-Diagramms liegen;
- die WASSER-ENERGIEDOSIS je Puls D^p muss im angegebenen Bereich liegen;
- die Pulswiederholfrequenz ν muss kleiner sein als der Kehrwert der IONENSAMMELZEIT τ .

Nur für die

Anhang B (informativ)

Berechnung der strahlungsqualitätsabhängigen KORREKTIONSFAKTOREN

B.1 Verfahren zur Berechnung der KORREKTIONSFAKTOREN von IONISATIONSKAMMERN als Bragg-Gray-Sonden

Die Abhängigkeit des ANSPRECHVERMÖGENS einer luftgefüllten IONISATIONSKAMMER von der STRAHLUNGS-QUALITÄT lässt sich ermitteln, wenn die IONISATIONSKAMMER als eine Sonde angenommen wird, die die BRAGG-GRAY-BEDINGUNGEN näherungsweise erfüllt. Nach DIN 6814-3 besteht dieser idealisierte Zustand für den luftgefüllten, wandlosen Hohlraum einer IONISATIONSKAMMER in einem Wasserphantom, wenn die folgenden drei Bedingungen erfüllt sind:

- die spektrale Teilchenflussdichte der den luftgefüllten Hohlraum durchlaufenden Elektronen der ersten Generation sowie ihre Energie- und Richtungsverteilung werden durch den Hohlraum nicht verändert;
- die spektrale Teilchenflussdichte der Elektronen aller Generationen ist im Hohlraum ortsunabhängig;
- im Falle von PHOTONENSTRAHLUNG ist die Energie, welche durch in Luft von Photonen ausgelöste Sekundärelektronen auf Luft übertragen wird, im Verhältnis zur insgesamt übertragenen Energie verschwindend klein.

Bei Einhaltung dieser Bedingungen stehen die LUFT-ENERGIEDOSIS im verschwindend kleinen Luftvolumen und die WASSER-ENERGIEDOSIS an diesem Ort im Verhältnis der MASSEN-STOSSBREMSVERMÖGEN der Elektronen der ersten Generation.

Die KORREKTIONSFAKTOREN k_Q und k_E werden zur Berechnung in zwei Teilfaktoren k'_Q und k''_Q bzw. k'_E und k''_E aufgespalten, entsprechend dem Verhalten eines idealen Bragg-Gray-Detektors und eines Detektors, der die BRAGG-GRAY-BEDINGUNGEN nur annähernd erfüllt:

$$k_Q = k'_Q k''_Q \quad (\text{B.1})$$

$$k_E = k'_E k''_E \quad (\text{B.2})$$

Der erste, von der Bauart unabhängige Faktor k'_Q bzw. k'_E berücksichtigt den Einfluss des MASSEN-STOSSBREMSVERMÖGENS von Wasser als Bezugsmaterial und von Luft als Sondenmaterial. Die ANZEIGE eines IONISATIONSDOSIMETERS ist proportional zur mittleren LUFT-ENERGIEDOSIS im Messvolumen, $M = c \cdot \bar{D}_a$. Der KORREKTIONSFaktor k'_Q einer die BRAGG-GRAY-BEDINGUNGEN ideal erfüllenden IONISATIONSKAMMER lässt sich mithilfe von Gleichung (1) ermitteln. Die Konstante c enthält unter anderem den mittleren Energieaufwand zur Erzeugung eines Ladungsträgerpaars und das Kammervolumen.

Für die Bezugsstrahlungsqualität ^{60}Co -Gammastrahlung ergibt sich die WASSER-ENERGIEDOSIS zu:

$$D_{\text{Co}} = N \cdot c \cdot \bar{D}_{a,\text{Co}} \quad (\text{B.3})$$

und für die STRAHLUNGSQUALITÄT Q zu:

$$D_Q = N \cdot c \cdot \bar{D}_{a,Q} \cdot k'_Q \quad (\text{B.4})$$

Alle anderen EINFLUSSGRÖSSEN haben dabei ihre BEZUGSWERTE.

Die Dosisverhältnisse $D/\bar{D}_a$ werden nach der Bragg-Gray-Theorie als Verhältnisse der Massen-Bremsvermögen beschrieben. In dieser Norm werden durchgängig beschränkte Bremsvermögensverhältnisse nach Spencer-Attix verwendet. Mit

$$\left(\frac{D}{\bar{D}_a}\right)_{C_0} = (s_{w,a}^{\Delta})_{C_0} \text{ und } \left(\frac{D}{\bar{D}_a}\right)_Q = (s_{w,a}^{\Delta})_Q \quad (\text{B.5})$$

erhält man:

$$k'_Q = \frac{(s_{w,a}^{\Delta})_Q}{(s_{w,a}^{\Delta})_{C_0}} \quad (\text{B.6})$$

und für ELEKTRONENSTRAHLUNG entsprechend

$$k'_E = \frac{(s_{w,a}^{\Delta})_{R_{50}}}{(s_{w,a}^{\Delta})_{C_0}} \quad (\text{B.7})$$

$(s_{w,a}^{\Delta})$ ist das Verhältnis der über die spektrale Elektronenfluenz am MESSORT gemittelten, beschränkten MASSEN-STOSSBREMSVERMÖGEN (siehe DIN 6814-2:2000-07) für Wasser (Index w) und Luft (Index a, für das englische Wort „air“) bei der mit dem jeweiligen unteren Index gekennzeichneten STRAHLUNGSQUALITÄT. Der Index Δ bezeichnet die Abschneide-Energie bei der Berechnung der hier verwendeten beschränkten MASSEN-STOSSBREMSVERMÖGEN. Die Begründung für die Verwendung beschränkter Massen-Stoßbremsvermögen ist im ICRU-Report 35 0 dargestellt.

k'_Q bzw. k'_E leistet den Hauptbeitrag zur Korrektur der Strahlungsqualitätsabhängigkeit.

ANMERKUNG Wird die STRAHLUNGSQUALITÄT durch R_{50} gekennzeichnet, verwendet man diesen Index in gleicher Bedeutung wie den Index E , z. B. in Gleichung (B.7) bei $(s_{w,a}^{\Delta})_{R_{50}}$.

Der zweite, von der Bauart abhängige Faktor k''_Q bzw. k''_E berücksichtigt, dass in der Praxis verwendete IONISATIONSKAMMERN die BRAGG-GRAY-BEDINGUNGEN nur angenähert erfüllen. Die Abweichungen sind aber klein und können als voneinander unabhängig angesehen werden. Sie lassen sich durch nur wenig von eins abweichende Faktoren, die so genannten Störfaktoren für die einzelnen Einflüsse bei der jeweiligen STRAHLUNGSQUALITÄT, beheben. Die Faktoren k''_Q und k''_E beinhalten diese Störfaktoren und berücksichtigen Form und Abmessungen der IONISATIONSKAMMER sowie die Anwesenheit von anderen Materialien als Luft und Wasser:

$$k''_Q = \frac{p_Q}{p_{C_0}} \quad (\text{B.8})$$

$$k''_E = \frac{p_E}{p_{C_0}} \quad (\text{B.9})$$

p_Q ist der Störungsfaktor für PHOTONENSTRAHLUNG mit der STRAHLUNGSQUALITÄT Q , p_{Co} der Störungsfaktor für ^{60}Co -Gammastrahlung. p_E ist der Störungsfaktor für ELEKTRONENSTRAHLUNG mit der Strahlungsqualitäts-Kennzeichnung R_{50} . Die Störungsfaktoren p berichtigen alle Abweichungen des Verhaltens der IONISATIONSKAMMER von einem idealen Bragg-Gray-Detektor bei der jeweiligen STRAHLUNGSQUALITÄT. Die Störungsfaktoren können jeweils als Produkt einzelner Faktoren geschrieben werden:

$$p_Q = (p_{\text{wall}} p_{\text{cav}} p_{\text{cel}} p_{\text{dis}} p_{\Delta})_Q \quad (\text{B.10})$$

Entsprechendes gilt für p_E und p_{Co} .

Dabei ist

- p_{wall} der Kammerwand-Störungsfaktor, der berücksichtigt, dass Sekundärelektronen mit verschiedenen Wechselwirkungskoeffizienten im Kammerwandmaterial (einschließlich einer gegebenenfalls vorhandenen Hülse für Wasserdichtheit) und im umgebenden Wasser erzeugt, gestreut und abgebremst werden;
- p_{cav} der Fluenz-Störungsfaktor, der die Änderung der Fluenz (die Störung der Energie- und Richtungsverteilung der Strahlung) im luftgefüllten Ionisationskammervolumen, vornehmlich durch Streueffekte hervorgerufen, gegenüber der Fluenz im ungestörten Wasser bei Abwesenheit der Kammer berücksichtigt;
- p_{cel} der Mittelelektroden-Störungsfaktor, der bei KOMPAKTKAMMERN mit einer Mittelelektrode aus Aluminium den Beitrag der aus dieser stammenden Elektronen zur Gesamtionisation im Messvolumen berücksichtigt;
- p_{Δ} der Abschneideenergie-Störungsfaktor, der die Verteilung der Trajektorienlängen von Sekundärelektronen im Luftvolumen von IONISATIONSKAMMERN unterschiedlicher Bauart berücksichtigt. In FLACHKAMMERN weicht diese Verteilung z. B. erheblich von derjenigen ab, die für das Luftvolumen von KOMPAKTKAMMERN gilt. Das nach Spencer und Attix [21] berechnete und hier angegebene beschränkte Massen-Bremsvermögensverhältnis $S_{w,a}^{\Delta}$ wurde mit einer Abschneideenergie Δ von 10 keV berechnet, die für KOMPAKTKAMMERN mit einem Innenradius von etwa 5 mm zutreffend ist. Nimmt man für die Abschneideenergie Δ wegen des geringeren Elektrodenabstandes für FLACHKAMMERN anstatt des Spencer-Attix-Wertes $\Delta = 10$ keV den Wert $\Delta = 5$ keV an, und verwendet man beschränkte MASSENSTOßBREMSVERMÖGEN nach ICRU 37 [26], dann ändert sich $\frac{(p_{\Delta})_{R_{50}}}{(p_{\Delta})_{Co}}$ im Promillebereich. Die Theorie dieses KORREKTIONSFAKTORS ist noch nicht quantitativ entwickelt, sodass keine Werte angegeben werden können;
- p_{dis} der Verdrängungs-Störungsfaktor. Er berücksichtigt den Verdrängungseffekt, die Verminderung der Dichte der Wechselwirkungen der PHOTONENSTRAHLUNG und der Sekundärelektronen im Luftvolumen der IONISATIONSKAMMER im Vergleich zur Dichte dieser Wechselwirkungen in dem durch das Luftvolumen verdrängten Phantommaterial Wasser. Der Verdrängungseffekt wird in dieser Norm nicht durch den Störungsfaktor p_{dis} , sondern durch die Positionierung der IONISATIONSKAMMER berücksichtigt.

Die einzelnen Störungen treten für PHOTONEN- und ELEKTRONENSTRAHLUNG bzw. KOMPAKT- und FLACHKAMMERN unterschiedlich auf. Tritt eine Störung nicht auf, hat der zugehörige Störungsfaktor den Wert eins und erscheint nicht in der entsprechenden Gleichung.

B.2 Zur Positionierung von KOMPAKTKAMMERN und FLACHKAMMERN

B.2.1 Berücksichtigung des Verdrängungseffektes bei KOMPAKTKAMMERN

Der Verdrängungseffekt, die Störung des Strahlungsfeldes durch die Anwesenheit der KOMPAKTKAMMER, führt im abfallenden Bereich der Tiefendosisverteilung zu einer Vergrößerung, im Aufbaubereich zu einer Verkleinerung der ANZEIGE, verglichen mit der ANZEIGE, die dem ungestörten STRAHLUNGSFELD in der Tiefe der Mittelachse der KOMPAKTKAMMER entsprechen würde. In beiden Fällen bewirkt der Verdrängungseffekt, dass die ANZEIGE der KOMPAKTKAMMER einer vom Radius des Luftvolumens abhängigen, von der Tiefe der Mittelachse in Richtung auf die Strahlungsquelle verschobenen MESSTIEFE entspricht.

Die notwendige Korrektur wird nach TRS 398 und nach dieser Norm in unterschiedlicher Weise durchgeführt. Nach TRS 398 werden KOMPAKTKAMMERN sowohl bei der Kalibrierung mit ^{60}Co -Gammastrahlung als auch für Dosismessungen unter REFERENZBEDINGUNGEN bei der STRAHLUNGSQUALITÄT Q mit ihrem BEZUGSPUNKT an den MESSORT im PHANTOM gebracht. Da es sich in beiden Fällen um Messungen an einem MESSORT im abfallenden Zweig der Tiefendosisverteilung handelt, bewirkt der Verdrängungseffekt eine Vergrößerung des Anzeigewertes im Vergleich zu einer idealen Bragg-Gray-Sonde. Daher hat p_{dis} Werte kleiner als 1 und beträgt z. B. für ^{60}Co -Gammastrahlung $1 - 0,004 r$, wobei r den Radius des Luftvolumens der KOMPAKTKAMMER in mm bezeichnet.

ANMERKUNG Die in TRS 398 verwendeten Werte von p_{dis} wurden der Arbeit von Johansson et al. [22], siehe auch Andreo [23], entnommen.

Nach dieser Norm werden KOMPAKTKAMMERN für Dosismessungen bei der STRAHLUNGSQUALITÄT Q so positioniert, dass der BEZUGSPUNKT der Kammer um $r/2$, den halben Innenradius der Außenelektrode, tiefer liegt als der MESSORT im PHANTOM (siehe 6.7.2). Infolge der Messortverschiebung kann dann der MESSWERT der Kammer entsprechend Gleichung (1) unmittelbar der WASSER-ENERGIEDOSIS am MESSORT zugeordnet werden. Dies gilt sowohl bei Messungen unter REFERENZBEDINGUNGEN als auch unter anderen Bedingungen, z. B. im Aufbaubereich der Tiefendosisverteilung. Bei Kalibrierungen von KOMPAKTKAMMERN mit ^{60}Co -Gammastrahlung wird jedoch auch nach dieser Norm der BEZUGSPUNKT der Kammer an den MESSORT gebracht. Diese unterschiedliche Positionierung wird durch den KORREKTIONSFAKTOR k_r nach Gleichung (5) berücksichtigt; dabei hat k_r die gleiche Bedeutung wie $1/(p_{\text{dis}})_{\text{Co}}$. Da nach dieser Norm der KORREKTIONSFAKTOR $(p_{\text{dis}})_Q/(p_{\text{dis}})_{\text{Co}}$ entfällt, wurden die k_Q -Werte aus TRS 398, die diesen Faktor enthalten, zur Umrechnung in die k_Q -Werte der Tabelle 6 dieser Norm mit $(p_{\text{dis}})_{\text{Co}}/(p_{\text{dis}})_Q$ multipliziert.

B.2.2 Berücksichtigung des Kammermaterials und des Verdrängungseffektes bei FLACHKAMMERN

Bei einer FLACHKAMMER hat die von Wasser abweichende Materialzusammensetzung des Strahlungseintrittsfensters und der Kammer-Hinterwand sowie die Verdrängung von Phantommaterial durch das Luftvolumen Einfluss auf die ANZEIGE, verglichen mit der ANZEIGE, die dem ungestörten STRAHLUNGSFELD in der Tiefe des BEZUGSPUNKTES entsprechen würde. Um diesen Effekt in erster Näherung zu berücksichtigen, wird der BEZUGSPUNKT einer FLACHKAMMER in der Tiefe $z_B = z_m + d_f - d_{\text{aq}}$ positioniert (siehe 6.7.3). Bei besonderen Genauigkeitsansprüchen kann es sinnvoll sein, bei der Positionierung einer FLACHKAMMER neben den Elektronendichten der Materialien von Vorderwand und Schutzkappe auch das Material der Hinterwand und die Verdrängung von Wasser durch das Luftvolumen der FLACHKAMMER zu berücksichtigen. So wurde für die Roos-Kammer experimentell festgestellt, dass die zugehörige MESSTIEFE im gesamten Bereich der Tiefendosisverteilungen von Photonen- und Elektronenstrahlung um $(0,5 \pm 0,1)$ mm größer ist als die Tiefe ihres BEZUGSPUNKTES [47], [48]. Im Vergleich zu einer Roos-Kammer, deren BEZUGSPUNKT in der MESSTIEFE positioniert wurde, wurde für die Markus-Kammer festgestellt, dass die MESSTIEFE um 1,7 mm größer ist als die Tiefe ihres BEZUGSPUNKTES [47].

B.3 Verfahren zur Berechnung des KORREKTIONSFAKTORS k_Q für PHOTONENSTRAHLUNG

B.3.1 Ermittlung von k'_Q für KOMPAKTKAMMERN

Tabelle B.1 zeigt Werte für k'_Q nach Gleichung (B.6) in Abhängigkeit vom STRAHLUNGSQUALITÄTSINDEX Q , wobei beschränkte MASSEN-STOSSBREMSVERMÖGEN berechnet nach Spencer und Attix [21] mit einer Abschneideenergie von $\Delta = 10$ keV verwendet wurden. Der Wert von $(s_{w,a}^\Delta)_{Co}$ beträgt 1,133. Bei der Berechnung von k'_Q wurden von Andreo [24], [25] berechnete beschränkte Massen-Bremsvermögensverhältnisse zugrunde gelegt, die auf den in ICRU 37 [26] tabellierten Massen-Stoßbremsvermögen beruhen. Die relative STANDARDMESSUNSICHERHEIT in k'_Q wird dort mit 0,5 % angegeben, die Zuordnung zum hochenergetischen Photonenstrahlungsfeld des Anwenders ergibt eine weitere relative STANDARDMESSUNSICHERHEIT von 0,3 %.

Tabelle B.1 — Werte des Faktors $k'_Q = (s_{w,a}^\Delta)_Q / (s_{w,a}^\Delta)_{Co}$ für $\Delta = 10$ keV in Abhängigkeit vom STRAHLUNGSQUALITÄTSINDEX Q für eine Tiefe von 10 cm, einem Fokus-Oberflächen-Abstand von 100 cm und einer FELDGRÖSSE von 10 cm × 10 cm in der Messtiefe. Die in [25] angegebenen Zahlenwerte der Massen-Stoßbremsvermögensverhältnisse für die STRAHLUNGSQUALITÄT Q wurden durch das Massen--Stoßbremsvermögensverhältnis 1,133 für ^{60}Co -Gammastrahlung dividiert

Q	0,50	0,53	0,56	0,59	0,62	0,65	0,68	0,70	0,72	0,74	0,76	0,78	0,80	0,82	0,84
k'_Q	1,002	1,001	0,999	0,997	0,996	0,992	0,988	0,983	0,979	0,974	0,967	0,960	0,952	0,943	0,932

B.3.2 Ermittlung von k''_Q für KOMPAKTKAMMERN

Der Faktor k''_Q ergibt sich nach den Gleichungen (B.8) und (B.10) zu:

$$k''_Q = \frac{p_Q}{p_{Co}} = \frac{(p_{wall} p_{cav} p_{cel} p_\Delta)_Q}{(p_{wall} p_{cav} p_{cel} p_\Delta)_{Co}} \quad (B.11)$$

p_{wall} , der Kammerwand-Störungsfaktor, kann nach Almond und Svensson [27] mit folgender, von Gillin u. a. [28] sowie Hanson und Dominguez-Tinoco [29] modifizierten Gleichung für die STRAHLUNGSQUALITÄT Q und ^{60}Co -Gammastrahlung berechnet werden:

$$p_{wall} = \frac{\alpha s_{Wand,a}^\Delta t_{w,Wand} + \tau s_{Hülse,a}^\Delta t_{w,Hülse} + (1 - \alpha - \tau) s_{w,a}^\Delta}{s_{w,a}^\Delta} \quad (B.12)$$

Hierin bedeuten α den Bruchteil der Gesamtionisation im Messvolumen, der durch Elektronen aus der Kammerwand, τ den Bruchteil, der durch Elektronen aus der Hülse hervorgerufen wird und $(1 - \alpha - \tau)$ den Bruchteil, der von Elektronen aus dem umgebenden Wasser herrührt. Werte für α , τ und $t_{w,mat}$ können mithilfe von Gleichungen aus TRS 398 berechnet werden. $t_{w/Wand}$ ist das Verhältnis der über die spektrale Photonen-Energiefluenz am MESSORT gemittelten Massen-Energieabsorptionskoeffizienten μ_{en}/ρ in Wasser (w) und im Wandmaterial (Wand) und $t_{w/Hülse}$ das entsprechende Verhältnis für Wasser und das Material der Hülse. Die Werte für p_{wall} in Tabelle 7 wurden mithilfe der Gleichung (B.12) entsprechenden Gleichung in TRS 398 errechnet, wobei eine Hülse aus PMMA mit einer Wanddicke von 0,5 mm angenommen wurde. Dies führt in einigen wenigen Fällen zu einer Vergrößerung des Wertes um 0,2 %, wobei sich insgesamt im Verhältnis der p_{wall} -Werte für hochenergetische PHOTONENSTRAHLUNG und ^{60}Co -Gammastrahlung eine relative STANDARDMESSUNSICHERHEIT von 0,5 % ergibt.

Für p_{cav} , den Fluenz-Störungsfaktor, wird sowohl für ^{60}Co -Gammastrahlung als auch bei der STRAHLUNGSQUALITÄT Q transientes Sekundärelektronen-Gleichgewicht in der Bezugstiefe bzw. in der REFERENZTIEFE und damit ein Wert eins mit vernachlässigbarer relativer STANDARDMESSUNSICHERHEIT angenommen.

p_{cel} , der Mittelelektroden-Störungsfaktor, ist bei ^{60}Co -Gammastrahlung bei KOMPAKTKAMMERN mit einer massiven Mittelelektrode aus Aluminium von eins verschieden. Es wird ein konstanter Faktor von 0,993 mit einer relativen STANDARDMESSUNSICHERHEIT von 0,2 % angenommen. Die Daten für p_{cel} bei der STRAHLUNGSQUALITÄT Q wurden aus Monte-Carlo-Rechnungen [30] sowie experimentell von Palm und Mattson [31] erhalten; sie haben Werte zwischen 0,992 3 und 0,995 7 bei einer relativen STANDARDMESSUNSICHERHEIT von 0,2 %. Die in TRS 398 gemachten Angaben wurden übernommen und sind in den Werten der Tabelle 6 enthalten. Die relative STANDARDMESSUNSICHERHEIT im Verhältnis der p_{cel} -Werte wird auf 0,1 % geschätzt.

p_{Δ} hat für die STRAHLUNGSQUALITÄT Q und ^{60}Co -Gammastrahlung den Wert eins.

B.3.3 Ermittlung des KORREKTIONSFAKTORS k_Q für FLACHKAMMERN

Da für hochenergetische Photonenstrahlungsfelder ein Verfahren zur Berechnung des Faktors k_Q'' von FLACHKAMMERN noch nicht entwickelt wurde, werden FLACHKAMMERN zurzeit nur für Relativmessungen der WASSER-ENERGIEDOSIS in hochenergetischen Photonenstrahlungsfeldern empfohlen.

B.4 Verfahren zur Berechnung des KORREKTIONSFAKTORS k_E für ELEKTRONENSTRAHLUNG

B.4.1 Ermittlung von k_E'

Für den Faktor $k_E' = \frac{(S_{w,a}^{\Delta})_{R_{50}}}{(S_{w,a}^{\Delta})_{\text{Co}}}$ nach Gleichung (B.7) wurden Zahlenwerte für den Zähler von Ding et al. [8] für eine große Anzahl von Beschleunigertypen und deren reale Elektronenspektren berechnet. Es zeigte sich, dass für die REFERENZTIEFE z_{ref} diese Daten durch eine einfache Anpassungsgleichung von Burns et al. [32] gut wiedergegeben werden, siehe Gleichung (20). Die Standardabweichung der Anpassungsgleichung an die von Ding et al. berechneten Werte beträgt 0,4 %.

B.4.2 Ermittlung von k_E''

Im bauartabhängigen Faktor k_E'' sind entsprechend den Gleichungen (B.9) und (B.10) alle Störungsfaktoren zusammengefasst

$$k_E'' = \frac{(p_{\text{wall}} p_{\text{cav}} p_{\text{cel}} p_{\Delta})_{R_{50}}}{(p_{\text{wall}} p_{\text{cav}} p_{\text{cel}} p_{\Delta})_{\text{Co}}} \quad (\text{B.13})$$

mit entsprechender Bedeutung wie bei PHOTONENSTRAHLUNG.

B.4.2.1 Kammerwand-Störungsfaktor p_{wall}

Im Elektronenstrahlungsfeld wird die Wandstörung sowohl für KOMPAKTKAMMERN als auch für FLACHKAMMERN für vernachlässigbar klein angesehen, weshalb $(p_{\text{wall}})_{R_{50}}$ zu eins angenommen wird. Die relative STANDARDMESSUNSICHERHEIT hierfür beträgt bei KOMPAKTKAMMERN 0,5 % und bei FLACHKAMMERN 0,3 %.

B.4.2.2 Fluenz-Störungsfaktor p_{cav}

Bei KOMPAKTKAMMERN tritt eine vom Kammerradius r und der mittleren Elektronenenergie abhängige Störung auf, die durch erhöhte Einstreuung von Elektronen in den luftgefüllten Hohlraum der IONISATIONSKAMMER bedingt ist. Experimentelle Daten zum KORREKTIONSFAKTOR sind in der Arbeit von Johansson et al. [22] enthalten. Die Anpassungsgleichung

$$p_{\text{cav}}(r, \bar{E}(z)) = 1 - 0,02155 \cdot r \cdot e^{-0,1224 \cdot \bar{E}(z)} \quad (\text{B.14})$$

[33] liefert eine gute formelmäßige Beschreibung dieser Daten, wobei $\bar{E}(z)$ die mittlere Elektronenenergie in MeV in der Tiefe z und r der Radius des Messvolumens in mm sind. Dabei wurde der folgende Zusammenhang zwischen der mittleren Energie an der Oberfläche $\bar{E}_0$ der praktischen Reichweite R_p und der mittleren Elektronenenergie $\bar{E}(z)$ in der Tiefe z verwendet [34]:

$$\bar{E}(z) = \bar{E}_0 \left(1 - \frac{z}{R_p} \right) \quad (\text{B.15})$$

Mit den in TRS 398 angegebenen Näherungsgleichungen:

$$\bar{E}_0 = 2,33 \cdot R_{50} \quad (\text{B.16})$$

$$R_p = 1,271 \cdot R_{50} - 0,23 \quad (\text{B.17})$$

kann der KORREKTIONSFAKTOR p_{cav} nun als Funktion von r , R_{50} und z bestimmt werden:

$$p_{\text{cav}}(r, R_{50}, z) = 1 - 0,02155 \cdot r \cdot e^{-0,2852 \cdot R_{50} \cdot \left(1 - \frac{z}{1,271 \cdot R_{50} - 0,23} \right)} \quad (\text{B.18})$$

mit r in mm, R_{50} in cm und z in cm.

Für FLACHKAMMERN mit breiter Schutzelektrode ist eine Störung durch den Hohlraum bei ELEKTRONENSTRAHLUNG vernachlässigbar und damit $p_{\text{cav}} = 1$.

Für die Markus-Kammer wird zur Bestimmung des KORREKTIONSFAKTORS p_{cav} in TRS 381 [35] folgende Gleichung angegeben:

$$p_{\text{cav}}^{\text{Markus}} = 1 - 0,039 \cdot e^{-0,2816 \cdot \bar{E}_z} \quad (\text{B.19})$$

In diesem Fall wurde jedoch nicht der vereinfachte Zusammenhang nach [34] von Gleichung (B.15), sondern von Andreo und Brahme [36] mit Monte-Carlo-Verfahren berechnete Daten von $\bar{E}(z)$ als Funktion von $\bar{E}_0$ und z verwendet. Die damit berechneten Fluenz-Störungsfaktoren sind

$$p_{\text{cav}}^{\text{Markus}}(z) = \frac{1}{1 + e^{a \left(\frac{z}{R_{50}} + b + c \cdot R_{50} + d \cdot z \right)}} \quad (\text{B.20})$$

mit $a = 0,149\,8$, $b = -21,733\,6$, $c = -4,337\,9$ und $d = 4,048\,7$ sowie R_{50} in cm.

B.4.2.3 Mittelelektroden-Störungsfaktor p_{cel}

Dieser Faktor ist bei KOMPAKTKAMMERN mit einer Mittelelektrode aus Aluminium von eins verschieden. Bei ELEKTRONENSTRAHLUNG wird in TRS 398 von einem konstanten Faktor von 0,998 mit einer relativen STANDARDMESSUNSICHERHEIT von 0,1 % ausgegangen.

B.4.2.4 Störungsfaktor p_{Δ} für veränderte Abschneideenergie

Da die Theorie dieses Störungsfaktors noch nicht quantitativ entwickelt ist, wird sein Wert zu eins angenommen.

Anhang C (normativ)

Experimentelle Ermittlung von k_E'' für FLACHKAMMERN

Sind keine Daten für den KORREKTIONSFAKTOR k_E'' einer FLACHKAMMER vorhanden, wird der Wert dieses Faktors durch den Vergleich der ANZEIGEN einer KOMPAKTKAMMER und der zu untersuchenden FLACHKAMMER bei gleicher DOSIS im STRAHLUNGSFELD einer ELEKTRONENSTRAHLUNG ausreichend hoher Energie nach den Gleichungen (1) und (11) experimentell ermittelt. Diese Messung wird bei einer FELDGRÖSSE von $20 \text{ cm} \times 20 \text{ cm}$ in der Tiefe des Energiedosismaximums bei der höchsten zur Verfügung stehenden Elektronenenergie ($\geq 15 \text{ MeV}$) durchgeführt. Dabei werden nacheinander eine kalibrierte KOMPAKTKAMMER und eine FLACHKAMMER nach der Positionierungsvorschrift nach 6.7 in die Tiefe des Wasser-Energiedosismaximums gebracht und mit gleicher DOSIS bestrahlt. Durch Anwendung der Gleichungen (1) und (11) auf die Messungen mit der FLACHKAMMER (oberer Index F) und der KOMPAKTKAMMER (oberer Index K) ergibt sich durch Gleichsetzen:

$$(k_E'')^F = \frac{(k_\rho k_s k_p k_T)^K N^K M_E^K}{(k_\rho k_s k_p k_T)^F N^F M_E^F} (k_E'')^K \quad (\text{C.1})$$

ANMERKUNG 1 Bei der Messung ist eine ausreichend hohe Elektronenenergie erforderlich, um den in k_E'' enthaltenen Störungsfaktor p_{cav}^K nahe eins und damit auch seine Unsicherheit genügend klein zu halten. So beträgt diese bei einer mittleren Energie $\bar{E}(z) = 15 \text{ MeV}$ für einen inneren Radius der KOMPAKTKAMMER von $r = 3 \text{ mm}$ etwa 1 %.

ANMERKUNG 2 Die Gründe für die Verwendung der Tiefe des Energiedosismaximums sind in [7] dargelegt.

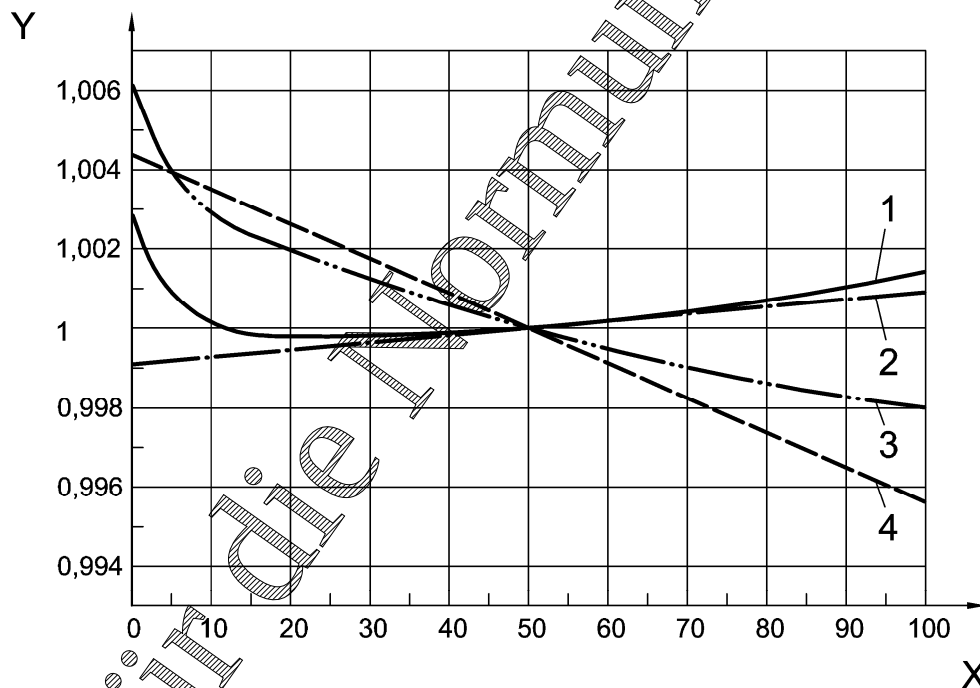
Nur für die Normungszusammenarbeit

Anhang D (informativ)

Der Einfluss der Luftfeuchte auf das ANSPRECHVERMÖGEN

Der Faktor k_h korrigiert bei der Messung der WASSER-ENERGIEDOSIS mit (offenen) IONISATIONSKAMMERN die Auswirkung einer Abweichung der Luftfeuchte von ihrem BEZUGSWERT (50 % relative Feuchte).

Der Anteil von Wasserdampf in der Luft — die Luftfeuchte — beeinflusst verschiedene physikalische Parameter, die bei der Bestimmung der WASSER-ENERGIEDOSIS(-LEISTUNG) mit IONISATIONSKAMMERN eine Rolle spielen [37], [38]. So ist bei vollständig mit Wasserdampf gesättigter Luft die Dichte im Vergleich zu trockener Luft um etwa 1 % geringer, die mittlere Energie zur Erzeugung eines Ionenpaares (der W -Wert) um etwa 0,9 % kleiner und das MASSEN-STOSSBREMSVERMÖGEN für Elektronen um etwa 0,2 % größer. Bei der Messung der WASSER-ENERGIEDOSIS mit IONISATIONSKAMMERN kompensieren sich diese drei Effekte jedoch zum großen Teil, sodass insgesamt eine deutlich geringere Abhängigkeit des ANSPRECHVERMÖGENS einer IONISATIONSKAMMER von der Luftfeuchte besteht.



Legende

- 1 Luftfeuchtekorrektionsfaktor k_h
- 2 MASSEN-STOSSBREMSVERMÖGEN
- 3 W -Wert
- 4 Luftdichte
- X relative Luftfeuchte in %
- Y Wert/ Wert bei 50% relativer Luftfeuchte

Bild D.1 — Abhängigkeit der Luftdichte, des W -Wertes, des MASSEN-STOSSBREMSVERMÖGENS und des KORREKTIONSFAKTORS für die Luftfeuchte von der relativen Luftfeuchte. Dargestellt ist jeweils das Verhältnis des Wertes der jeweiligen Größe bei der entsprechenden Luftfeuchte zum Wert bei der relativen Feuchte von 50 %. Die Abbildung gilt für einen Luftdruck von 101,325 kPa und eine Temperatur von 20 °C

Literaturhinweise

- [1] TRS IAEA, Technical Report 277 (1987): *Absorbed dose determination in photon and electron beams. An International Code of Practice*. Technical Report No. 277. International Atomic Energy Agency, Wien
- [2] White, D.R. (1979): *Tissue substitutes in experimental radiation physics*. Med. Phys. 5.467–479
- [3] Christ, G., Dohm, O.S., Schüle, E., Gaupp, S., Martin, M.: „Air density correction in ionization dosimetry“. In: Phys. Med. Biol. 49 (2004) 2029–2039
- [4] Bruggmoser, G. et al: *Determination of the Recombination Correction Factor k_{r} for Plane-Parallel and Cylindrical Ionization Chambers in Pulsed Beams*. In: Phys. Med. Biol. 52 (2007) N35–N50
- [5] Weinhaus, M.S., Meli, J.A. (1984): *Determining P_{ion} , the correction factor for recombination losses in an ionization chamber*. In: Med. Phys. 11 (6), 846–849
- [6] Sanchez-Doblado, F., Andreo, P., Capote, R., Leal, A., Perucha, M., Arrans, R., Nunez, L., Mainegra, E., Lagares, J.I., Carrasco, E.: *Ionization chamber dosimetry of small photon fields: a Monte Carlo study on stopping-power ratios for radiosurgery and IMRT beams*. In: Phys. Med. Biol. 2003 (14) 2081–99
- [7] Kapsch, R.-P., Bruggmoser, G., Christ, G., Dohm, O.S., Hartmann, G.H., Schüle, E.: *Experimental determination of pCo perturbation factors for plane-parallel chambers*. In: Phys. Med. Biol. 52 (2007) 7167–7181
- [8] Ding, G.X., Rogers, D.W.O., Mackie, T.R.: *Calculation of stopping-power ratios using realistic clinical electron beams*. In: Med. Phys. 22 (1995) 489–501
- [9] *Expression of the Uncertainty of Measurement in Calibration*, first edition, European co-operation for Accreditation (Utrecht, The Netherlands), dtsh: DKD-3 Angabe der Messunsicherheit beim Kalibrieren, 1998, Hrsg. PTB-Wirtschaftsverlag NW
- [10] Supplement 1 to EA-4/02: *Expression of the Uncertainty of Measurement in Calibration – Examples*, first edition, European co-operation for Accreditation (Utrecht, The Netherlands), dtsh: DKD-3-E1 Angabe der Messunsicherheit beim Kalibrieren, Beispiele, 1998, Hrsg. PTB-Wirtschaftsverlag NW
- [11] International Organization for Standardization: „*Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement*“, 2nd edn, Geneva (1995)
- [12] Bentley, Robin, E.: „*Uncertainty in Measurement: The ISO Guide*“, Monograph 1 NML Technology Transfer Series, National Measurement Laboratory CSIRO, Sydney (2003)
- [13] DIN 1319-3:1996, *Grundlagen der Messtechnik — Teil 3: Auswertung von Messungen einer einzelnen Messgröße, Messunsicherheit*
- [14] DIN 1319-4:1999, *Grundlagen der Messtechnik — Teil 4: Auswertung von Messungen; Messunsicherheit*
- [15] Deutscher Kalibrierdienst: „*DKD-3: Angabe der Messunsicherheit bei Kalibrierungen*“, DKD (2002)
- [16] Boag, J.W. (1966): *Ionization Chambers*. In: Attix, F.H., Roesch, W.C., Hrsg. Radiation Dosimetry Vol. 2, 1–72, Academic Press
- [17] ICRU Report 34 (1982): *The dosimetry of pulsed radiation*. ICRU, Bethesda
- [18] Reich, H. Hrsg. (1990): *Dosimetrie ionisierender Strahlung*. B.G. Teubner, Stuttgart

- [19] Derikum, K., Roos, M. (1993): *Measurements of saturation correction factors of thimble-type ionization chambers in pulsed photon beams*. In: Phys. Med. Biol. 38, 755–763
- [20] Derikum, K. (2002): *Die allgemeinen Korrekturen bei der Ionisationsdosimetrie*. In: Kramer, H.-M., Derikum, K. Hrsg., PTB-Dos-41
- [21] Spencer, L.V., Attix, F.H. (1955): *A theory of cavity ionization*. Rad. Res. 63, 191–199
- [22] Johansson, K.A., Mattsson, L.O., Lindborg, L., Svensson, H.: „Absorbed-dose determination with ionization chambers in electron and photon beams having energies between 1 and 50 MeV“, National and International Standardization of Radiation Dosimetry (Proc Symp. Atlanta, 1977), Vol. 2, IAEA, Vienna (1978) 243
- [23] Andreo, P.: *Absorbed dose beam quality factors for the dosimetry of high-energy photon beams*. In: Phys. Med. Biol. 37 (1992) 2189–2211
- [24] Andreo, P.: *Dosimetry of high-energy photon beams. Present status and future prospects for the data used in ionization chamber dosimetry*. Report RI 1991-03, Radiation Physics Department, University of Stockholm (1991)
- [25] Andreo, P.: „Improved calculations of stopping-power ratios and their correlation with the quality of therapeutic photon beams“, Measurement Assurance in Dosimetry (Proc. Symp. Vienna, 1993), Vienna IAEA (1994) 335–359
- [26] ICRU-Report 37 (1984): *Stopping Powers for Electrons and Positrons*. ICRU, Bethesda
- [27] Almond, P.R., Svensson, H.: *Ionization chamber dosimetry for photon and electron beams. Theoretical considerations*, Acta Radiol. Ther. In: Phys. Biol. 16 (1977) 177
- [28] Gillin, M.T., Kline, R.W., Niroomand-Rad, A., Grimm, D.F.: *The effect of thickness of the waterproofing sheath*. In: Med. Phys. 12 (1985), 234–236
- [29] Hanson, W.F., Dominguez-Tinocino, J.A.: *Effects of the plastic protective caps on the calibration of therapy beams in water*. In: Med. Phys. 12 (1985) 243–248
- [30] Ma, C.M., Nahum, A.E.: *Effect of the size and composition of the central electrode on the response of cylindrical ionisation chambers in high-energy photon and electron beams*. In: Phys. Med. Biol. 38 (1993) 267–290
- [31] Palm, A., Mattson, O.: *Experimental study on the influence of the central electrode in Farmer-type ionization chambers*. In: Phys. Med. Biol. 44 (1999) 1299–1308
- [32] Burns, D.T., Ding, G.X., Rogers, D.W.O.: *R_{50} as a beam quality specifier for selecting stopping-power ratios and reference depths for electron dosimetry*. In: Med. Phys. 23 (1996) 383–388
- [33] Hohlfield, K., Roos, M.: *Dosismessverfahren für Ionisationskammern, die zur Anzeige der Wasser-Energiedosis kalibriert sind*. In: Med. Physik 86 (L. von Klitzing Hrsg.) 255–263, DGMP Lübeck, ISBN-3-925218-03-3
- [34] Harder, D.: „Energiespektren schneller Elektronen in verschiedenen Tiefen“, Symposium on High Energy Electrons-Montreux, 1964 (Proc Symp. Berlin), Springer-Verlag (1965) 26–33
- [35] TRS-IAEA, Technical Report 381 (1997): *The use of plane-parallel ionization chambers in high-energy electron and photon beams*. International Atomic Energy Agency, Wien
- [36] Andreo, P., Brahme, A.: „Mean energy in electron beams“. In: Med. Phys. 8 (1981) 6
- [37] Rogers, D.W.O., Ross, C.K.: *The role of humidity and other correction factors in the AAPM TG-21 dosimetry protocol*. In: Med. Phys. 15 (1988), 40–48

- [38] TRS IAEA, Technical Report 374 (1994): *Calibration of Dosimeters Used in Radiotherapy*. International Atomic Energy Agency, Wien.
- [39] DIN 6809-1, *Klinische Dosimetrie — Therapeutische Anwendung gebündelter Röntgen-, Gamma- und Elektronenstrahlung*
- [40] DIN 6809-4, *Klinische Dosimetrie — Anwendung von Röntgenstrahlen mit Röhrenspannungen von 10 bis 100 kV in der Strahlentherapie und in der Weichteildiagnostik*
- [41] DIN 6809-5, *Klinische Dosimetrie — Teil 5: Anwendung von Röntgenstrahlen mit Röhrenspannungen von 100 bis 400 kV in der Strahlentherapie*
- [42] DIN 6809-6, *Klinische Dosimetrie — Teil 6: Anwendung hochenergetischer Photonen- und Elektronenstrahlung in der perkutanen Strahlentherapie*
- [43] BJR Supplement 25: *Central Axis Depth Dose Data for Use in Radiotherapy*, British Institute of Radiology, London, 1996
- [44] Buckley, L.A., Rogers, D.W.O.: *Wall correction factors, P_{wall} , for parallel-plate ionization chambers*. In: Med. Phys. 33 (2006), 1788–1796
- [45] Verhaegen, F., Zakikhani, R., DuSautoy, A., Palmans, H., Bostock, G., Shipley, D., Seuntjens, J.: *Perturbation correction factors for the NACP-02 plane-parallel ionization chamber in water in high-energy electron beams*. In: Phys. Med. Biol. 51 (2006), 1221–1235
- [46] Mainegra-Hing, E., Kawrakow, I., Rogers, D.W.O.: *Calculations for plane-parallel ion chambers in ^{60}Co beams using the EGSnrc Monte Carlo code*. In: Med. Phys. 30 (2003), 179–189
- [47] Loe, H.K., Rühmann, A., Willborn, K., Harder, D., Poppe, B.: *Experimentelle Ermittlung der äquivalenten Messtiefe dosimetrischer Detektoren für 6 MV- und 15 MV-Photonenstrahlung*. DEGRO 2007, Hannover 2007
- [48] Bruggmoser, G., Saum, R., Schmid, F.: *Wo befindet sich der effektive Messort einer PTW 34001 Roos-Kammer?* In: Dreiländertagung für Mediz. Physik (Hrsg. R. Mini), Bern, Sept. 2007
- [49] Zink, K., Wulff, J.: *Monte Carlo Simulationen zur Elektronendosimetrie unter Nicht-Referenzbedingungen*. In: Dreiländertagung für Mediz. Physik (Hrsg. R. Mini), Bern, Sept. 2007
- [50] Zink, K., Wulff, J.: *Monte Carlo Simulationen des bauartabhängigen Korrekturfaktors k'_E für die klinische Elektronendosimetrie mit Rooskammern*. In: Dreiländertagung für Mediz. Physik (Hrsg. R. Mini), Bern, Sept. 2007
- [51] Griesbach, I., Gademann, G., Abou Mandour, M., Harder, D.: *Messungen zur Systematik der Wandeckeffekte von Fricke- und Thermolumineszenzdosimetern bei Photonen- und Elektronenstrahlung*. In: Med. Physik 2001 (Hrsg. K. Welker und K. Zink Hrsg.) 185–186, DGMP Berlin, ISBN-3-89391-960-0
- [52] ICRU-Report 35, *Radiation Dosimetry: Electron Beams with Energies Between 1 and 50 MeV*. ICRU (1984), Bethesda

Stichwortverzeichnis

Für alle in der vorliegenden Norm definierten oder verwendeten Begriffe enthält das Stichwortverzeichnis Angaben der betreffenden Textstellen entsprechend der Dezimalklassifikation sowie die englische Übersetzung der Begriffsbenennungen. Für die in anderen DIN-Normen oder internationalen Empfehlungen definierten Begriffe ist die betreffende Publikation angegeben.

Begriff	Textstelle	Quelle	Englische Übersetzung
ANSPRECHVERMÖGEN	3.1, 6.4, 7.4, 7.5, 7.6, 8.21, 8.22, 9.21, 10.3, B.1, D	3.1	RESPONSE
ANZEIGE	4, 6.1, 6.2, 6.3, 7.4, 8.1, 9.1.1, 10.3.2, 10.3.6, A.1, B.1, B.2, C.1	IMV 2:1993	INDICATION
AUSGLEICHSFILTER	8.1	DIN 6814-2:2000-07	FIELD-FLATTENING FILTER
BESTRAHLUNGSRAUM	10.3.7	DIN 6814-5:2001-03	IRRADIATION ROOM
BEZUGSBEDINGUNGEN	6.2, 6.3, 6.4, 7.4, 7.6, 10.2.8	3.3	REFERENCE CONDITIONS
BEZUGSPUNKT	6.2, 6.7, 7.6, B.2	3.4	REFERENCE POINT
BEZUGSWERT	6.3, 7.1, 10.4, B.1, D	3.5	REFERENCE VALUE
BRAGG-GRAY-BEDINGUNGEN	3.23, B.1	DIN 6814-3	BRAGG-GRAY CONDITIONS
DOSIS	3.1, 3.6, 5.1, 6.3, 7.6, A.1, B.1, C	DIN EN 60731:2006-09	DOSE
EINFLUSSGRÖSSE	3.3, 3.5, 3.6, 3.20, 6.1, 6.3, 6.4, 10.4, B.1	DIN EN 60731:2006-09	INFLUENCE QUANTITY
ELEKTRONENSTRAHLUNG	1, 5.3, 6.1, 6.4, 7.3, 7.4, 9.1, 9.2, 9.3, 10.3, B.1, B.4	DIN 6814-2:2000-07	ELECTRON RADIATION
ENERGIEABHÄNGIGKEIT	3.7, 5.3, 7.6	DIN 6800-5:2005-04	ENERGY DEPENDENCE
FELDGRÖSSE	5.1, 6.2, 6.4, 6.5, 6.6, 7.4, 8.1, 8.3, 9.1, 9.2, 9.3, 10.4, B.3, C	DIN 6814-8:2000-12	FIELD SIZE
FLACHKAMMER	3.8, 5.2, 5.3, 6.7, 9.1, 9.2, 9.3, 10.3, 10.4, A.2, B.1, B.3, B.4, C	DIN EN 60731:2006-09	PARALLEL-PLATE CHAMBER
HALBWERTTIEFE	5.3, 9.1	DIN 6814-2:2000-07	HALF VALUE DEPTH
HERSTELLER	5.4, 6.7, 7.4	E DIN EN 60601-1:2004-07	MANUFACTURER
IONENSAMMELZEIT	7.3, A.2	E DIN IEC 60050-394	ION COLLECTION TIME
IONISATIONSDOSEMETER	3.9, 6.2, 8.1, B.1	3.9	IONIZATION DOSEMETER
IONISATIONSKAMMER	1, 3.10, 4, 5.1, 6.2, 6.4, 6.7, 7.1, 7.3, 7.6, 8.2, 9.1, 9.2, 10.6, A.1, A.2, B.1, B.2, D	DIN EN 60731:2006-09	IONIZATION CHAMBER
KALIBRIERFAKTOR	3.11, 6.1, 6.2, 6.8, 7.4, 7.6, 10.3, 10.4	3.11	CALIBRATION FACTOR
KOMPAKTKAMMER	3.12, 5.2, 5.3, 6.1, 6.7, 7.6, 9.1, 9.2, 9.3, 10.3, 10.4, A.1, B.1, B.2, B.3, B.4, C	DIN EN 60731:2006-09	SHELL CHAMBER

Begriff	Textstelle	Quelle	Englische Übersetzung
KORREKTIONSFAKTOR	3.13, 5.3, 6.1, 6.2, 6.3, 6.4, 6.5, 7.1, 7.2, 7.3, 7.4, 7.5, 7.6, 8.2, 8.3, 9.2, 9.3, 10.3, 10.4, A.1, A.2, B.1, B.2, B.3, B.4	3.13	CORRECTION FACTOR
LUFT-ENERGIEDOSIS	5.3, B.1	DIN 6814-3	ABSORBED DOSE TO AIR
MASSEN-STOSSBREMSVERMÖGEN	B.1, D	DIN 6814-2:2000-07	COLLISION MASS STOPPING POWER
MESSGRÖSSE	6.2, 10.1	DIN 1319-1:1995-01	MEASURED QUANTITY
MESSORT	3.15, 4, 5.1, 5.2, 6.1, 6.3, 6.7, 7.3, 8.1, 8.2, 8.3, B.1, B.3	3.15	POINT OF MEASUREMENT
MESSTIEFE	6.2, 6.4, 6.6, 6.7, 7.4, 8.3, 9.3, 10.5, A.1, B.3	3.16	DEPTH OF MEASUREMENT
MESSUNSICHERHEIT	3.17, 6.1, 6.3, 10.1, 10.2, 10.3, 10.4, A.1	DIN 1319-1:1995-01	UNCERTAINTY OF MEASUREMENT
MESSWERT	3.18, 6.2, 10.1, A.1, B.2	DIN 1319-1:1995-01	MEASURED VALUE
NATIONALES NORMAL	3.19	IMV 2:1993	NATIONAL MEASUREMENT STANDARD
NENNGEBRAUCHSBEREICH	3.20, 6.3, 10.3, A.1	DIN EN 60731:2006-09	RATED RANGE OF USE
PHANTOM	4, 5.3, 6.1, 5.2, 6.4, 6.6, 6.7, 7.4, 8.1, 9.1, 9.2, 10.3, A.1, B.2	DIN 6814-8:2000-12	PHANTOM
PHOTONENSTRAHLUNG	5.2, 6.1, 6.4, 7.4, 7.6, 8.1, 8.2, 8.3, 10.3, 10.4, B.1, B.3, B.4	DIN 6814-2:2000-07	PHOTON RADIATION
PRIMÄRNORMAL-MESSEINRICHTUNG	6.2	3.21	PRIMARY STANDARD MEASURING EQUIPMENT
REFERENZBEDINGUNGEN	1, 6.1, 6.4, 6.5, 8.2, 8.2.1, 8.2.3, 8.3, 8.3.1, 9.2, 9.2.1, 9.2.1, 9.3.3, 10.3.8, 10.4, B.2	3.22	REFERENCE CONDITIONS
REFERENZTIEFE	6.4, 9.1.2, 9.2.3, 9.2.4, 9.3.2, 10.3.8, B.3.2, B.4.1	DIN 6809-6	REFERENCE DEPTH
STRAHLERKOPF	8.1, 8.3	DIN 6814-8:2000-12	RADIATION HEAD
STRAHLUNGSFELD	5.1, 6.3, 10.3, A.2, B.2, B.3, C	DIN 6814-2:2000-07	RADIATION FIELD
STRAHLUNGSQUALITÄT	5.1, 5.3, 6.1, 6.2, 6.3, 6.4, 7.4, 8.1, 8.2, 9.1, 9.2, 10.3, 10.4, B.1, B.2, B.3	DIN 6814-2:2000-07	RADIATION QUALITY
STRAHLUNGSQUALITÄTSINDEX	3.24, 8.1, 8.3	DIN 6814-2:2000-07	RADIATION QUALITY INDEX
WASSER-ENERGIEDOSIS	1, 4, 5.1, 5.2, 5.3, 6.1, 6.2, 6.3, 6.4, 6.5, 6.6, 7.3, 7.6, 8.3, 9.1, 9.3, 10.1, 10.2, 10.4, A.2, B.1, B.2, B.3, C, D	DIN 6814-3	ABSORBED DOSE TO WATER
WASSER-ENERGIEDOSISLEISTUNG	4, A.2	DIN 6814-3	ABSORBED DOSE RATE TO WATER