

# DIN 6801-1:2019-09 (D)

## Dosismessverfahren nach der Sondenmethode für Protonen- und Ionenstrahlung - Teil 1: Ionisationskammern

---

| Inhalt   | Seite |
|--|-------|
| Vorwort .....  | 6     |
| Einleitung .....   | 7     |
| 1 Anwendungsbereich.....   | 9     |
| 2 Normative Verweisungen .....   | 10    |
| 3 Begriffe .....   | 10    |
| 4 Messprinzip und Messverfahren .....  | 19    |
| 5 Ionisationskammern für die Dosismessung und für die Ermittlung von<br>Dosisverteilungen .....  | 19    |
| 5.1 Allgemeines zur Auswahl der Bauart von Ionisationskammern .....  | 19    |
| 5.2 Einsatz von Kompaktkammern .....   | 20    |
| 5.3 Einsatz von Flachkammern .....   | 21    |
| 5.4 Großflächige Kammern .....   | 21    |
| 5.5 Übersicht zur Auswahl der Bauart von Ionisationskammern .....  | 22    |
| 5.6 Positionierung von Ionisationskammern.....   | 22    |
| 6 Allgemeines zur Messung der Wasser-Energiedosis .....  | 23    |
| 6.1 Gleichung zur Ermittlung der Wasser-Energiedosis.....  | 23    |
| 6.2 Der Kalibrierfaktor und zugehörige Bezugsbedingungen.....  | 23    |
| 6.3 Einflussgrößen und Korrektionsfaktoren.....  | 25    |
| 6.4 Referenzbedingungen für die Messung der Wasserenergiedosis von Protonen- und<br>Ionenstrahlung.....  | 25    |
| 6.4.1 Allgemeines.....   | 25    |
| 6.4.2 Referenzbedingungen für energiemodierte Protonen- und Ionenstrahlung .....   | 26    |
| 6.4.3 Referenzbedingungen bei monoenergetischer Strahlung .....  | 27    |
| 6.4.4 Zusätzliche spezifische Referenzbedingungen .....  | 28    |
| 6.4.5 Zusammenfassung der Referenzbedingungen.....   | 29    |
| 6.5 Nicht-Referenzbedingungen und zugehörige KORREKTIONSFAKTOREN.....  | 29    |
| 7 Ermittlung der strahlungsqualitätsunabhängigen KORREKTIONSFAKTOREN.....  | 30    |
| 7.1 Allgemeines.....   | 30    |
| 7.2 Korrektionsfaktor $k_p$ für die Luftdichte .....   | 30    |
| 7.3 Korrektionsfaktor $k_p$ für die Polarität der Kammerspannung.....  | 30    |
| 7.4 Korrektionsfaktor $k_s$ für unvollständige Sättigung .....   | 31    |
| 7.5 Korrektionsfaktor $k_T$ für den Einfluss der unterschiedlichen Positionierung von<br>Kompaktkammern bei der Kalibrierung und bei der Messung ..... | 31    |
| 7.6 Korrektionsfaktor $k_{PMMA}$ für den Einfluss der Fluenzänderung bei Verwendung eines<br>PMMA-Phantoms statt eines Wasser-Phantoms .....           | 32    |
| 8 Messung der Wasser-Energiedosis.....   | 32    |
| 8.1 Kennzeichnung und Ermittlung der Strahlungsqualität .....  | 32    |
| 8.2 Messung der Wasser-Energiedosis unter Referenzbedingungen.....   | 32    |
| 8.2.1 Allgemeines.....   | 32    |
| 8.2.2 Bedeutung des Korrektionsfaktors $k_{Q,R}$ .....   | 33    |
| 8.2.3 Experimentelle Werte des Korrektionsfaktors $k_{Q,R}$ .....  | 33    |

|   |  |    |
|---|--|----|
| 8.2.4   | Berechnete Werte des Korrektionsfaktors $k_{Q,R}$ für Protonen .....   | 33 |
| 8.2.5   | Berechnete Werte des Korrektionsfaktors $k_{Q,R}$ für Alphateilchen .....  | 35 |
| 8.2.6   | Berechnete Werte des Korrektionsfaktors $k_{Q,R}$ für Ionenstrahlung mit $2 < Z \leq 10$ .....   | 37 |
| 8.3   | Messung der Wasser-Energiedosis unter Nicht-Referenzbedingungen .....  | 38 |
| 8.3.1   | Allgemeines.....   | 38 |
| 8.3.2   | Tiefendosisverteilungen.....   | 38 |
| 8.3.3   | Querverteilungen.....  | 39 |
| 8.3.4   | Output-Faktoren.....   | 39 |
| 8.3.5   | Verwendung anderer Materialien als das Referenzmaterial PMMA .....   | 40 |
| 9   | Messunsicherheitsanalyse .....   | 40 |
| Anhang A (normativ) Berechnung der strahlungsqualitätsabhängigen Korrektionsfaktoren.....   |  | 41 |
| A.1   | Trennung von $k_{Q,R}$ in zwei Teilfaktoren.....   | 41 |
| A.2   | Der Teilfaktor $k'_Q$ .....  | 41 |
| A.2.1   | Allgemeines.....   | 41 |
| A.2.2   | Zahlenwerte für $^{60}\text{Co}$ -Gammastrahlung als Bezugsstrahlung für die Kalibrierung.....   | 42 |
| A.2.3   | Zahlenwerte für Protonen- und Ionenstrahlung.....  | 42 |
| A.3   | Der Teilfaktor $k''_Q$ .....   | 44 |
| A.3.1   | Allgemeines.....   | 44 |
| A.3.2   | Zahlenwerte für $k'_Q$ .....   | 44 |
| A.3.3   | Umrechnung von $p_{\text{Co}}$ -Werten für Kompaktkammern aus dem internationalen<br>Dosimetrieprotokoll TRS 398 .....   | 46 |
| Anhang B (informativ) Herleitung und Berechnung des Korrektionsfaktors $k_r$ .....  |  | 48 |
| Anhang C (normativ) Erforderliche Umrechnungen und Korrektion zur Bestimmung der<br>Wasser-Energiedosis in einem PMMA-Phantom.....                      |  | 49 |
| C.1   | Allgemeines.....   | 49 |
| C.2   | Grundsätzliches .....  | 49 |
| C.3   | Zahlenwerte.....   | 50 |
| C.3.1   | Massendichte $\rho_{\text{PMMA}}$ .....  | 50 |
| C.3.2   | Tiefenskalierungsfaktoren $c_{\text{PMMA}}$ und $f_{\text{PMMA}}$ .....  | 50 |
| C.3.3   | Korrektionsfaktor $k_{\text{PMMA}}$ zur Berücksichtigung des Einflusses der Fluenzänderung bei<br>der Verwendung eines PMMA-Phantoms statt eines Wasserphantoms..... | 51 |
| C.3.4   | Zusammenfassung .....  | 53 |
| Anhang D (informativ) Zur Positionierung des Bezugspukts von Kompaktkammern bezüglich<br>der Messtiefe bei Protonen- und Ionenstrahlung.....            |  | 54 |
| D.1   | Allgemeines.....   | 54 |
| D.2   | Analytische Berechnung des Verschiebungsparameter $p$ bei Vernachlässigung der<br>Streuung.....  | 54 |
| D.3   | Literaturwerte für den Verschiebungsparameters $p$ .....   | 57 |
| Anhang E (normativ) Korrektion der unvollständigen Sättigung.....   |  | 58 |
| E.1   | Einführung.....  | 58 |
| E.2   | Anzuwendendes Verfahren.....   | 58 |
| Anhang F (informativ) Massen-Stoßbremsvermögen von Protonen- und Ionenstrahlung und<br>Verhältnis der Massen-Stoßbremsvermögen von Wasser zu Luft ..... |  | 60 |
| F.1   | Massen-Stoßbremsvermögen .....   | 60 |
| F.2   | Bedeutung des mittleren Ionisationspotenzials des Targetmaterials für das<br>elektronische MASSEN-STOßBREMSVERMÖGEN .....  | 61 |
| F.3   | Inkonsistenz der Datenlage zum mittleren Ionisationspotenzial.....   | 62 |
| F.4   | Verhältnis des Massen-Stoßbremsvermögens Wasser zu Luft .....  | 63 |
| F.5   | Näherungsweise Berechnung des Verhältnisses des Massen-Stoßbremsvermögens<br>Wasser zu Luft.....   | 64 |
| Literaturhinweise.....  |  | 67 |

|   |    |
|---|----|
| Stichwortverzeichnis .....  | 70 |
| <br>  |    |
| <b>Bilder</b>   |    |
| Bild 1 — Prozentuale Tiefendosisverteilung von Protonenstrahlung mit einer Anfangsenergie von 235 MeV und einer Energiemodulation mit Hilfe eines mechanischen Modulators .....   | 11 |
| Bild 2 — Berechnete Tiefendosisverteilung von $^{12}\text{C}$ Ionen in Wasser mit einer Eingangsenergie je Nukleon von 270 MeV.....   | 14 |
| Bild 3 — Prozentuale Tiefendosisverteilungen, Bragg-Peak und praktische Reichweite $R_p$ von 200 MeV Protonen (a) und 270 MeV Kohlenstoffionen (b) für eine quasi-unendliche Feldgröße .....  | 16 |
| Bild 4 — Tiefenverteilungen der Wasser-Energiedosis in Wasser einer Kohlenstoffstrahlung mit einer maximalen Energie pro Nukleon von 290 MeV bei unterschiedlicher Energiemodulation .....  | 18 |
| Bild 5 — Mit Hilfe der biologischen Modellierung errechnete Tiefenverteilungen der RBW-gewichteten Dosis in Wasser bei gleicher Energiemodulation wie in Bild 3 [17] .....  | 18 |
| Bild 6 — Prozentuale Tiefendosisverteilung von monoenergetischen Protonen- und Kohlenstoff-Ionenstrahlung in Wasser bei einer quasi-unendlichen Feldgröße, jeweils mit einer praktischen Reichweite von 1,5 cm (Berechnung der Protonenkurve nach Bortfeld 1997 [8], Berechnung der Ionenkurve analog zu Bild 1) .....              | 21 |
| Bild 7 — Beispiel der Abmessungen eines PMMA-Phantoms zur Aufnahme einer Farmerkammer mit einem Durchmesser des Messvolumens von 6,1 mm für die Dosisbestimmung unter Referenzbedingungen für monoenergetische Ionenstrahlung und monoenergetische Protonenstrahlung mit einer Energie $< 100$ MeV bei seitlicher Einstrahlung..... | 28 |
| Bild A.1 — Nach Gleichung (A.3) berechnetes Verhältnis der Massenbremsvermögen von Wasser zu Luft für Protonen, Alphateilchen und Ionenstrahlung mit $2 \leq Z \leq 10$ . Die Werte für Protonen sind identisch mit den in TRS 398 [16] angegebenen Werten.....   | 43 |
| Bild C.1 — Experimentell bestimmte Abhängigkeit des Fluenz-Korrektionsfaktors $k_{\text{PMMA}}$ von der wasseräquivalenten Tiefe für 75 MeV Protonen (Palmans et al. [32]).....   | 51 |
| Bild C.2 — Berechnete Abhängigkeit des Fluenz-Korrektionsfaktors $k_{\text{fl,PMMA}}$ von der wasseräquivalenten Tiefe für Protonen (Lühr et al. [25]) .....  | 52 |
| Bild C.3 — Berechnete Abhängigkeit des Fluenz-Korrektionsfaktors $k_{\text{fl,PMMA}}$ von der wasseräquivalenten Tiefe für Kohlenstoffionen (Lühr et al. [25]).....   | 53 |
| Bild D.1 — Geometrische Verhältnisse zur analytischen Berechnung des Verschiebungsparameters $p$ bei der Positionierungsvorschrift.....   | 54 |
| Bild D.2 — Beispiel der Abhängigkeit des analytisch berechneten Verschiebungsparameter $p$ von dem Korrektionsfaktor $f$ .....  | 57 |
| Bild F.1 — Einfluss des verwendeten Wertes des Ionisationspotenzials auf die berechnete Tiefe des Bragg-Peaks in Wasser bei einer quasi-unendlichen Feldgröße von Kohlenstoffionen mit einer Anfangsenergie von 270 MeV/n, berechnet mit Shield-Hit (Henkner, 2010 [14]) .....  | 62 |

**Bild F.2 — Verhältnis des Massen-Stoßbremsvermögens Wasser zu Luft für Kohlenstoffionen nach Gleichung (F.9) mit  $E_0 = 430$ ,  $I_w = 78$ ,  $I_a = 82,8$  und  $R_p = 30,9$ . Zusätzlich gezeigt sind die Werte einer Monte Carlo Berechnung für 430 MeV Kohlenstoffionen (Lühr) ..... 65**

**Bild F.3 — Verhältnis des Massen-Stoßbremsvermögens Wasser zu Luft für Protonen und unterschiedliche Ionensorten, entnommen aus TRS 398 [16] ..... 66**

**Tabellen**

**Tabelle 1 — Anwendungsbereich der Norm in Bezug auf die praktische Reichweite und in Bezug auf die Eintrittsenergien pro Nukleon (in MeV) ..... 9**

**Tabelle 2 — Zusammenstellung der Auswahl der Bauart von Ionisationskammern ..... 22**

**Tabelle 3 — Zusammenstellung der EINFLUSSGRÖßEN und der Bezugsbedingungen bei der Kalibrierung..... 24**

**Tabelle 4 — Zusammenfassung der Referenzbedingungen zur Ermittlung der Energiedosis von Protonen- und Ionenstrahlung..... 29**

**Tabelle 5 — Berechnete Werte des Korrektionsfaktors  $k_{Q,R}$  für Protonen für unterschiedliche Bauarten von Ionisationskammern als Funktion der Strahlungsqualität  $R_{res}$  ..... 34**

**Tabelle 6 — Berechnete Werte des Korrektionsfaktors  $k_{Q,R}$  für Alphateilchen für unterschiedliche Bauarten von Ionisationskammern als Funktion der Strahlungsqualität  $R_{res}$ ..... 36**

**Tabelle 7 — Berechnete Werte des Korrektionsfaktors  $k_{Q,R}$  für Ionenstrahlung mit  $2 < Z \leq 10$  für unterschiedliche Bauarten von Ionisationskammern als Funktion der Strahlungsqualität  $R_{res}$ ..... 37**

**Tabelle A.1 — Werte der Koeffizienten a, b und c zur Berechnung des Verhältnisses des Massen-Stoßbremsvermögens nach Gleichung (A.3) für Protonen, Alphateilchen und Ionenstrahlung mit  $2 \leq Z \leq 10$  ..... 43**

**Tabelle A.2 — Werte des mittleren Ionisationspotenzials von Wasser und Luft..... 43**

**Tabelle A.3 —  $p_{Co}$  - und  $k_Q$  - Werte für ausgewählte Flachkammern ..... 45**

**Tabelle A.4 — Innenradius  $r$ , und Werte für  $k_r$ ,  $p_{Co}^{[DIN]}$  sowie  $k_Q$  für ausgewählte Kompaktkammern..... 46**

**Tabelle C.1 — Zahlenwerte, die zur Dosisbestimmung in PMMA benötigt werden ..... 53**

**Tabelle F.1 — Publierte Werte des mittleren Ionisationspotenzials von Wasser und Luft ..... 63**