DIN 6809-9:2021-11 (D)

Klinische Dosimetrie - Teil 9: Strahlungsqualität von Photonenstrahlung im Patienten oder Phantom

Inhalt

Seite

Vorwort ... 6

Einleitung ... 7

1 Anwendungsbereich ... 8

2 Normative Verweisungen ... 8

3 Begriffe ... 8

4 Spektren ... 10
4.1 Allgemeines ... 10
4.2 Photonenspektren innerhalb der geometrischen Feldgrenzen ... 10
4.3 Spektren außerhalb der geometrischen Feldgrenzen ... 12

5 Einfache Kenngrößen des Spektrums ... 14
5.1 Allgemeines ... 14
5.2 Streuanteil der Dosis ... 14
5.3 Dosisanteil der niederenergetischen Komponente ... 15
5.3.1 Relativer Dosisanteil der niederenergetischen Komponente ... 15
5.3.2 Dosisprofile der niederenergetischen Komponente ... 17
5.4 Mittlere Energie der spektralen Photonenfluenz ΦE ... 18

Anhang A (informativ) Spektrales Ansprechvermögen von Detektoren ... 21
A.1 Allgemeines ... 21
A.2 Ansprechvermögen gebräuchlicher Sonden ... 21

Anhang B (informativ) Ansprechvermögen von Detektoren unter Nicht-Referenzbedingungen ... 24
B.1 Grundlagen ... 24
B.2 Monte Carlo-basierte Verfahren ... 24
B.3 Werte von $k_{NR,Q}$ für Ionisationskammern ... 25
B.4 Werte von $k_{NR,Q}$ für Thermolumineszenzdetektoren ... 25
B.5 Werte von $k_{NR,Q}$ für Silizium-Dioden ... 26

Anhang C (informativ) Dosis-Umrechnungsfaktoren ... 27
C.1 Allgemeines ... 27
C.2 Verschiedene Körpergewebe ... 27
C.3 Knochenhaut, rotes Knochenmark ... 28
C.4 Dosis-Umrechnungsfaktoren in Absorbern ... 29

Anhang D (informativ) Relative biologische Wirksamkeit und Kenngrößen der Teilchenbahnstruktur ... 30
D.1 Allgemeines ... 30
D.2 Definition der relativen biologischen Wirksamkeit ... 30
D.3 Relative biologische Wirksamkeit für molekulare und zelluläre Strahlenwirkungen ... 32
D.3.1 DNA-Schäden ... 32
D.3.2 Chromosomen-Aberrationen ... 32
D.3.3 Neoplastische Zelltransformation ... 34
D.3.4 Zellinaktivierung ... 34
D.3.5 Strahleninduzierte Karzinogenese ... 34
D.4 Teilchenbahnstruktur, Lineares Energieübertragungsvermögen, Lineale Energie ... 35
D.5 Mikrodosimetrische Kennzeichnung der Strahlungsqualität (Anwendungen) ... 37
D.6 Zusammenfassende Bewertung ... 38

Anhang E (informativ) Berücksichtigung der Strahlungsqualität bei der Bestrahlungsplanung 39
E.1 Allgemeines 39
E.2 Grenzflächen zwischen Weichteilgeweben und orthopädischen Implantaten 39
E.2.1 Senkrechter Einfall des Strahls 39
E.2.2 Einfall des Photonenstrahls unter verschiedenen Winkeln „Schrägeinfall“ 42
E.3 Grenzflächen zwischen Weichteilgeweben und Dentalimplantaten 43
E.4 Bestrahlungen im Bereich des Mediastinums und der Lungen 43
E.4.1 Grundlagen 43
E.4.2 Kleines Feld 48
E.4.3 Großes Feld 48
E.5 Berechnung von Dosisverteilungen im Patienten 48
E.5.1 Allgemeines 48
E.5.2 Berücksichtigung von Prothesen in der Bestrahlungsplanung 48
E.5.3 Auswirkung von Inhomogenitäten in der Lunge oder Hals-Nasen-Ohrenbereich in der Bestrahlungsplanung 48
E.5.4 Vermeidbare periphere Dosis bei Bestrahlungen im Mediastinum/Brustbereich 49

Literaturhinweise 51

Bilder

Bild 1 — Normierte spektrale Energiefluenz ΨE von Photonenspektren in der Teletherapie in Abhängigkeit von der Feldgröße und Tiefe 11

Bild 2 — Normierte spektrale Energiefluenz ΨE von Photonenspektren in der Teletherapie an Punkten außerhalb der Feldmitte 12

Bild 3 — Normierte Energiefluenz ΨE von Photonenspektren in der Teletherapie an Aufpunkten außerhalb des geometrischen Bestrahlungsfeldes im Vergleich zu Aufpunkten auf der Strahlachse 13

Bild 4 — Feldgrößen- und Tiefen-Abhängigkeit von $P_{\mathrm{D}}^{200\ \mathrm{keV}}$ für 6 MV [(a) und (b)] und 15 MV [(c) und (d)] für axiale Aufpunkte in den Tiefen 2 cm bis 20 cm in Wasser 16

Bild 5 — 2D-Profile der Größe $P_{\mathrm{D}}^{200\ \mathrm{keV}}$ in Wasser für Teletherapiefelder mit 6 MV (a, c) und 15 MV (b, d) bei den Feldgrößen 5 cm × 5 cm (a, b) und 30 cm × 30 cm (c, d) 17

Bild 6 — Laterales Dosisprofil der Photonen mit Energien unterhalb der Abschneide-Energie E_{cut} = 200 keV für Primärstrahlung von 6 MV (a) und 15 MV (b) 18

Bild 7 — Variation der mittleren Photonenenergie EF (a) mit der Tiefe entlang der Strahlachse, (b), (c), (d) mit dem seitlichen Achsenabstand in den Tiefen 5 cm, 10 cm und 20 cm in einem Wasserphantom für 6 MV-Photonen bei verschiedenen Feldgrößen 19

Bild 8 — Variation der mittleren Photonenenergie EF (a) mit der Tiefe entlang der Strahlachse, (b), (c), (d) mit dem seitlichen Achsenabstand in den Tiefen 5 cm, 10 cm und 20 cm in einem Wasserphantom für 15 MV-Photonen bei verschiedenen Feldgrößen 20

Bild A.1 — Energieabhängigkeit des Ansprechvermögens von Si-Dioden bezüglich monoenergetischer Photonenstrahlung 22

Bild A.2 — Relatives Ansprechvermögen in Abhängigkeit von der mittleren Photonenenergie von Alanin 22

Bild A.3 — Verhältnis der Massen-Energieabsorptionskoeffizienten von AgBr-Film zu Wasser (NIST-Daten) 23

Bild A.4 — Gemessenes relatives Ansprechvermögen (RR) in Abhängigkeit von der mittleren Photonenenergie von in der Strahlentherapie verwendeten Thermolumineszenz-Dosimetern (TLD) [80] 23

Bild B.1 — Abhängigkeit von $k_{NR,Q}$ für LiF:Mg,Ti Chips von der mittleren Photonenenergie E_m mit $k_{NR,Q} = 1$ für 6 MV unter Referenzbedingungen (Feldgröße 10 cm × 10 cm, Messtiefe 10 cm) 25

Bild C.1 — Quotienten der Massen-Energieabsorptionskoeffizienten verschiedener Gewebe zu denen von Wasser in Abhängigkeit von der Photonenenergie 28

Bild C.2 — Umrechnungsfaktoren von der Dosis in rotem Knochenmark bzw. in der Knochenhaut zu der in Wasser in Abhängigkeit von der Photonenenergie unter Berücksichtigung des fehlenden Sekundärelektronengleichgewichts 29

Bild D.1 — Kumulative alterskorrigierte Inzidenz von Lebertumoren bei BC3F1-Mäusen, die im Alter von 3 Monaten mit Spaltneutronen oder 250 kV_p-Röntgenstrahlung exponiert wurden, als Funktion der applizierten Energiedosis [75]. Für die Wirkungsniveaus 12,5 %, 20 %, 30 % und 40 % ist die RBW angegeben 32

Bild D.2 — Photonen-Energieabhängigkeit der durch Doppelmarkierung mit den Proteinen γ-H2AX und 53BP1 sichtbar gemachten DNA-Schäden nach 24 h Reparaturzeit in menschlichen 184A1-Brustdrüsen-Epithelzellen [46] 32

Bild D.3 — Experimentelle Werte des Koeffizienten α (en: yield coefficient) für die zelluläre Ausbeute an dizentrischen Chromosomen nach Photonenbestrahlung menschlicher Lymphozyten *in-vitro* (Symbole) und biophysikalische Erklärung durch die Ausbeute an korrelierten Elektronen-Bahnenenden-Gruppen, die zur Deletion von Chromatinschleifen in der Lage sind [81] 33

Bild D.4 — Relative biologische Wirksamkeit am Beispiel der neoplastischen Zelltransformation überlebender C3H10T1/2-Mäuseembryo-Fibroblasten nach Bestrahlung in der exponentiellen Wachstums-Phase mit charakteristischer Röntgenstrahlung des Kohlenstoffs (C_K-Strahlung, 278 eV) und mit ^{60}Co -Gammastrahlung als Referenzstrahlung [52]. Die RBW-Angaben beziehen sich auf verschiedene Wirkungsniveaus [75] 34

Bild D.5 — Prinzip der *Bahnstruktur* eines ionisierenden Teilchens als geometrische Anordnung von Ionisations- und Anregungsprozessen entlang der Flugbahn des Teilchens. Direkte Wechselwirkungen des ionisierenden Teilchens bilden den *Bahnkern* und Wechselwirkungen der ionisierenden Sekundärteilchen den *Halbschatten.* Dabei gilt Δx = Längenelement der Bahnstruktur, auf das sich die Angabe ΔE der durch diese Wechselwirkungen in Atomen und Molekülen deponierten Energie bezieht [45] 35

Bild D.6 — Prinzip der „Linealen Energie" $y = \varepsilon l$ zur Kennzeichnung der Bahnstruktur eines ionisierenden Teilchens. Dabei ist ε die gesamte Energiedeposition innerhalb einer gewebegefüllten Kugel mit dem Durchmesser d und der mittleren Sehnenlänge $l = 2/3 d$ [45] 36

Bild E.1 — Einfluss einer 3 cm dicken Titanschicht auf die Tiefendosiskurve (Wasser-Energiedosis) in Abhängigkeit von der Photonenenergie für typische hochenergetische Photonenstrahlungen mit nominellen Beschleunigungsspannungen von 6 MV und 24 MV (5 cm × 5 cm Feldgröße, SSD = 100 cm, Monte-Carlo-Simulation mit EGSnrc) 40

Bild E.2 — Winkelabhängiger Rückstreuungs-Dosisfaktor $p_{b,\alpha}$ für unterschiedliche Energien und Einfallswinkel [2] 43

Bild E.3 — Geometrie für die folgenden Betrachtungen 44

Bild E.4 — Transversale und longitudinale Dosisprofile bei der in Bild E.3 dargestellten geometrischen Situation für Photonenstrahlung von 6 MV, 10 MV, 15 MV und 24 MV und bei der Feldgröße 3 cm × 3 cm 46

Bild E.5 — Transversale und longitudinale Dosisprofile bei der in Bild E.3 dargestellten geometrischen Situation für Photonenstrahlung von 6 MV, 10 MV, 15 MV und 24 MV und bei der Feldgröße 10 cm × 10 cm 48

Bild E.6 — Relative periphere Dosiserhöhung für unterschiedliche Photonenenergien im Vergleich zu 6 MV bei der Feldgröße 3 cm × 3 cm 49

Bild E.7 — Relative periphere Dosiserhöhung für unterschiedliche Photonenenergien im Vergleich zu 6 MV bei der Feldgröße 10 cm × 10 cm 50

Tabellen

Tabelle C.1 — Umrechnungsfaktoren zwischen der Dosis in verschiedenen Körpergeweben und Wasser für zwei Photonenspektren in 10 cm Tiefe auf der Zentralachse. Die Feldgröße ist 10 cm × 10 cm, die Beschleunigungsspannung 6 MV bzw. 15 MV. 29

Tabelle E.1 — Rückstreuungs-Dosisstörungsfaktoren p_b für Abstand x zur Grenzfläche einer Titanschicht von 3 cm Dicke in Wasser 40

Tabelle E.2 — Rückstreuungs-Dosisstörungsfaktoren p_b für Abstand x zur Grenzfläche einer Titanschicht von 5 cm Dicke in Wasser. Kreisförmiges Feld 5 cm Durchmesser, senkrechter Einfall auf die Oberfläche des Phantoms. (Monte Carlo Simulation mit EGSnrc, [5] [4]) 41

Tabelle E.3 — Vorwärtsstreuungs-Dosisfaktoren p_f für unterschiedliche distale Abstände von einer Titanschicht von 3 cm Dicke 41

Tabelle E.4 — Vorwärtsstreuungs-Dosisfaktoren p_f für unterschiedliche distale Abstände von einer Titanschicht von 5 cm Dicke, kreisförmiges Feld mit 5 cm Durchmesser, senkrechter Einfall auf die Oberfläche des Phantoms. (Monte Carlo Simulation mit EGSnrc) 42