

Inhalt	Seite
Vorwort .....	7
Einleitung .....	9
1 Anwendungsbereich.....	10
2 Normative Verweisungen .....	10
3 Begriffe .....	10
4 Symbole und Abkürzungen .....	16
5 Messverfahren.....	17
6 Messung der Wasser-Energiedosis im kleinen Kalibrierfeld mit Ionisationskammern als Bezugsnormale.....	19
6.1 Allgemeines.....	19
6.2 Das kleine Kalibrierfeld zur Durchführung einer Anschlussmessung.....	19
6.2.1 Allgemeines.....	19
6.2.2 Im kleinen Kalibrierfeld als Bezugsnormale geeignete Ionisationskammern.....	19
6.2.3 Positionierung von Ionisationskammern.....	20
6.3 Ermittlung der Wasser-Energiedosis im kleinen Kalibrierfeld mit Ionisationskammern.....	21
6.3.1 Allgemeines.....	21
6.3.2 Ermittlung des Strahlungsqualitätsindex $Q$ der einfallenden Photonenstrahlung für die Dosimetrie im kleinen Kalibrierfeld.....	22
6.3.3 Ermittlung des Korrektionsfaktors $k_{Q,M}$ .....	24
6.3.4 Ermittlung des Korrektionsfaktors $k_{NR,Q}$ .....	25
6.4 Anschlussmessung hochauflösender Detektoren im kleinen Kalibrierfeld .....	25
6.4.1 Für die Dosismessung in kleinen Strahlungsfeldern geeignete räumlich hochauflösende Detektoren.....	25
6.4.2 Positionierung räumlich hochauflösender Detektoren bei der Messung im kleinen Kalibrierfeld.....	27
6.4.3 Bedingungen für die Kalibrierung (Anschlussmessung) von räumlich hochauflösenden Detektoren im kleinen Kalibrierfeld .....	27
6.4.4 Durchführung der Kalibrierung im kleinen Kalibrierfeld zur Ermittlung des Kalibrierfaktors $N_{KK}$ .....	29
6.4.5 Rekalibrierung räumlich hochauflösender Detektoren im kleinen Kalibrierfeld.....	30
7 Messung der Wasser-Energiedosis mit räumlich hochauflösenden Detektoren in kleinen Strahlungsfeldern unter Nicht-Kalibrierbedingungen .....	30
7.1 Allgemeines.....	30
7.2 Gleichung zur Ermittlung der Wasser-Energiedosis im kleinen Strahlungsfeld mit räumlich hochauflösenden Detektoren .....	31
7.3 Werte des Korrektionsfaktors $k_{NKK}$ .....	31
7.3.1 Allgemeines.....	31
7.3.2 Durch Monte-Carlo-Simulation und experimentell ermittelte feldgrößenabhängige Korrektionsfaktoren $k_{NKK}$ bei der Messung der Wasser-Energiedosis auf der Zentralstrahlachse .....	32
7.3.3 Durch Messung ermittelte feldgrößenabhängige Korrektionsfaktoren $k_{NKK}$ zur Anwendung bei Messungen der Wasser-Energiedosis auf der Zentralstrahlachse im Vergleich zu Monte-Carlo-Werten von $k_{NKK}$ .....	36
7.3.4 Korrektionsfaktor $k_{NKK}$ ohne Beschränkung des Messorts auf die Zentralstrahlachse, allgemeine Darstellung als Produkt aus Störungsfaktoren.....	41

8	Ermittlung der Wasser-Energiedosis auf der Achse des Nutzstrahlenbündels zur Bestimmung der Streubeiträge .....	42
8.1	Allgemeines .....	42
8.2	Die Komponenten der Streubeiträge: Totaler Streufaktor, Strahlerkopf-Streufaktor und Phantom-Streufaktor .....	42
8.3	Messung des totalen Streufaktors in Wasser $S_{cp}$ .....	44
8.4	Messung des Strahlerkopf-Streufaktors in Luft $S_c$ .....	44
8.5	Messung der Zentralstrahldosis aus dem Dosisflächenprodukt .....	46
8.6	Messung von Dosisprofilen .....	47
8.7	TPR-Messungen und Tiefendosismessungen .....	47
9	Messunsicherheit und Messabweichungen .....	48
9.1	Allgemeines .....	48
9.2	Messunsicherheit der im kleinen Kalibrierfeld gemessenen Wasser-Energiedosis .....	49
9.3	Messunsicherheit des Kalibrierfaktors eines räumlich hochauflösenden Detektors im kleinen Kalibrierfeld .....	49
9.4	Messunsicherheit der unter Nicht-Kalibrierbedingungen gemessenen Wasser-Energiedosis .....	49
Anhang A (informativ) Physikalische Eigenschaften kleiner Photonenfelder .....		51
A.1	Allgemeines .....	51
A.2	Einfluss der Feldgröße auf die Form der Tiefendosiskurve .....	51
A.3	Feldgrößenabhängiger Dosisanteil der niederenergetischen Streustrahlung .....	52
A.4	Feldgrößenabhängigkeit der mittleren Photonenenergie am Messort im Phantom .....	53
A.5	Lateraler Sekundärelektronentransport .....	55
A.6	Einfluss des lateralen Sekundärelektronentransports auf das Dosis-Querprofil .....	55
Anhang B (normativ) Festlegung des kleinen Kalibrierfelds und Messung mit Ionisationskammern als Bezugsnormen .....		58
B.1	Allgemeines .....	58
B.2	Bedeutung des kleinen Kalibrierfeldes und der Korrektionsfaktoren im Rahmen der Dosimetrie kleiner Photonen-Strahlungsfelder .....	58
B.3	Auswahl der Feldgröße des kleinen Kalibrierfeldes .....	59
Anhang C (informativ) Dosismessungen in kleinen Feldern mit hochauflösenden Detektoren, der Korrektionsfaktor $k_{NKK}$ unter beliebigen Messbedingungen .....		61
C.1	Allgemeines .....	61
C.2	Der Volumeneffekt und der Störungsfaktor $p_v$ .....	61
C.3	Der Störungsfaktor $p_v$ bei hochauflösenden Ionisationskammern .....	64
C.4	Rechnerische Korrektion eines gemessenen Dosisprofils .....	68
C.5	Der Störungsfaktor $p_{sp}$ zur Berücksichtigung des energieabhängigen Ansprechvermögens räumlich hochauflösender Detektoren in kleinen Strahlungsfeldern .....	70
Anhang D (informativ) Parametrisierung von Streufaktoren und relativen Dosisverteilungen .....		72
D.1	Allgemeines .....	72
D.2	Totale Streufaktoren $S_{cp}$ bei kleinen Feldern .....	72
D.3	Phantom-Streufaktoren $S_p$ bei kleinen Feldern .....	73
D.4	Relative Tiefendosis und Gewebe-Phantom-Verhältnis (TPR) .....	76
Anhang E (informativ) Beispiele für Messunsicherheitsbudgets .....		77
E.1	Allgemeines .....	77
E.2	Messunsicherheitsbudget für die Messung der Wasser-Energiedosis im kleinen Kalibrierfeld mit einer kalibrierten Ionisationskammer nach DIN 6800-2 .....	77
E.3	Messunsicherheitsbudget für die Kalibrierung einer Silizium-Diode im kleinen Kalibrierfeld .....	78
E.4	Messunsicherheitsbudget für die Messung der Wasser-Energiedosis unter Nicht-Kalibrierbedingungen .....	79
Literaturhinweise .....		80
Stichwortverzeichnis .....		90

## Bilder

Bild 1	— Schema des Verfahrens zur Dosimetrie kleiner Strahlungsfelder im Wasserphantom.....	18
Bild 2	— Werte des Korrektionsfaktors $k_{\text{NKK}}$ auf der Zentralstrahlachse als Funktion der Feldabmessung (siehe auch Tabelle 6).....	33
Bild 3	— Beispiel des durch Messung ermittelten feldgrößenabhängigen Korrektionsfaktors $k_{\text{NKK}}$ auf der Zentralstrahlachse für FELDABMESSUNGEN $a = 0,5$ cm bis $a = 4$ cm im Vergleich zu Monte-Carlo berechneten Werten — Diode PTW 60017 (in paralleler Orientierung).....	37
Bild 4	— Beispiel des durch Messung ermittelten feldgrößenabhängigen Korrektionsfaktors $k_{\text{NKK}}$ auf der Zentralstrahlachse für FELDABMESSUNGEN $a = 0,5$ cm bis $a = 4$ cm im Vergleich zu Monte-Carlo berechneten Werten — Diamant PTW 60019 (in paralleler Orientierung).....	38
Bild 5	— Beispiel des durch Messung ermittelten feldgrößenabhängigen Korrektionsfaktors $k_{\text{NKK}}$ auf der Zentralstrahlachse für FELDABMESSUNGEN $a = 0,5$ cm bis $a = 4$ cm im Vergleich zu Monte-Carlo berechneten Werten — Ionisationskammer PTW 31014 [in paralleler (II) und senkrechter (T) Orientierung].....	39
Bild 6	— Beispiel des durch Messung ermittelten feldgrößenabhängigen Korrektionsfaktors $k_{\text{NKK}}$ auf der Zentralstrahlachse für FELDABMESSUNGEN $a = 0,5$ cm bis $a = 4$ cm im Vergleich zu Monte-Carlo berechneten Werten — Szintillator Exradin W1 [in paralleler (II) und senkrechter (T) Orientierung] .....	40
Bild 7	— Werte des Quotienten $[M_{\text{Ala}}(a)/M_{\text{Ala}}(a_{\text{KK}})]/[M_{\text{Det}}(a)/M_{\text{Det}}(a_{\text{KK}})]$ .....	41
Bild 8	— Messung des Dosisflächenproduktes mit einer großflächigen Parallelplatten-Ionisationskammer.....	47
Bild A.1	— Relative Tiefendosiskurve einer 15-MV-Photonenstrahlung im Wasserphantom bei verschiedenen FELDABMESSUNGEN $a$ quadratischer Felder .....	52
Bild A.2	— Feldgrößenabhängigkeit des relativen Dosisanteils von Photonen mit Energien $< 200$ keV auf der Strahlachse in verschiedenen Tiefen bei 6-MV-Photonenstrahlung .....	52
Bild A.3	— Mittlere Photonenenergie $\overline{EF}$ in Wasser für Beschleuniger mit Ausgleichsfilter (WFF) bei einer nominellen Beschleunigungsspannung von 6 MV (oben) bzw. 15 MV (unten) für verschiedene Tiefen und Achsenabstände (siehe Chofor [30]) .....	54
Bild A.4	— Mittlere Photonenenergie $\overline{EF}$ in Wasser für Beschleuniger ohne Ausgleichsfilter im Achsenabstand $r = 0$ cm in Abhängigkeit von der Tiefe unter verschiedenen Bedingungen .....	54
Bild A.5	— Nach Gleichung (A.7) berechnete relative Dosisquerverteilungen.....	57
Bild B.1	— Messwertverhältnis der PTW 60012 Silizium-Diode zur Ionisationskammer PTW 31010 SemiFlex bei 6 MV (oben) und 15 MV (unten) für 5 cm Wassertiefe und 10 cm Wassertiefe, normiert auf die Feldabmessung $a = 4$ cm .....	60
Bild C.1	— Dosisprofil, erzeugt durch einen 5 mm breiten Schlitzstrahl von 6-MV-Photonen in 5 cm Wassertiefe, gemessen mit hochauflösenden Detektoren nach Kalibrierung im kleinen Kalibrierfeld .....	62

Bild C.2 — Experimentell ermittelte rotationssymmetrische laterale Dosis-Ansprechfunktionen $K(r)$ von vier hochauflösenden Detektoren bei 6 MV in 5 cm Wassertiefe [119] .....	64
Bild C.3 — Beispiele für die Werte von $p_v$ in Längs- und Querrichtung, abzüglich des Summanden 1, zur Berücksichtigung des Volumeneffektes für vier Ionisationskammern als Funktion der Feldabmessung $a$ quadratischer Felder bei nominellen Beschleunigungsspannungen 6 MV und 15 MV .....	67
Bild D.1 — Korrigierte Messwerte des totalen Streufaktors $S_{cp}$ in Wasser für 6-MV-Photonenstrahlung in Abhängigkeit von der Feldabmessung $s$ eines (streu- äquivalenten Quadratfeldes und Anpassungskurve nach Gleichung (D.1).....	73
Bild D.2 — Messwerte und Monte-Carlo-simulierte Werte des Phantom-Streufaktors $S_p(a)$ für Photonenstrahlung mit der nominellen Beschleunigungsspannung 6 MV und Anpassungsfunktion nach Gleichung (D.2) .....	74

## Tabellen

Tabelle 1 — Abmessungen von zylindrischen Ionisationskammern, die als Bezugsnormale geeignet sind sowie ihre Standardabweichungen $\sigma$ der lateralen Dosis-Ansprechfunktion und Bezugspunktverschiebungen $\Delta z$ .....	20
Tabelle 2 — Parameter zur Bestimmung des Strahlungsqualitätsindex $Q$ , gültig für $0,62 < Q < 0,8$ ....	23
Tabelle 3 — Abmessungen von kleinen luftgefüllten zylindrischen Ionisationskammern sowie ihre Standardabweichungen $\sigma$ der lateralen Dosis-Ansprechfunktion und Bezugspunktverschiebungen $\Delta z$ .....	25
Tabelle 4 — Detektorabmessungen und Positionierung flüssigkeitsgefüllter Ionisationskammern, Silizium-Dioden und Diamant-Detektoren sowie deren Bezugspunktverschiebung $\Delta z$ .....	26
Tabelle 5 — Einflussgrößen und Kalibrierbedingungen für Anschlussmessungen im kleinen Kalibrierfeld.....	27
Tabelle 6 — Korrektionsfaktor $k_{NKK}$ auf der Zentralstrahlachse bei verschiedenen Feldgrößen für einige Detektortypen bei 6 MV-Photonenstrahlung im Fokus-Oberflächenabstand 90 cm in 10 cm Tiefe im Wasserphantom, normiert auf ein Feld $4 \text{ cm} \times 4 \text{ cm}$ .....	34
Tabelle 7 — Korrektionsfaktor $k_{NKK}$ auf der Zentralstrahlachse bei verschiedenen Feldgrößen für einige Detektortypen bei 10 MV-Photonenstrahlung im Fokus-Oberflächenabstand 90 cm in 10 cm Tiefe im Wasserphantom, normiert auf ein $4 \text{ cm} \times 4 \text{ cm}$ Feld .....	35
Tabelle 8 — Korrektionsfaktor $k_{NKK}$ auf der Zentralstrahlachse für verschiedene Detektortypen bei 6 MV-Photonenstrahlung ohne Ausgleichsfilter (CyberKnife <sup>a</sup> ) bei einem Fokus-Oberflächenabstand 78,5 cm in 1,5 cm Tiefe im Wasserphantom für kreisförmige Felder, normiert auf ein Feld mit 6 cm Durchmesser .....	35
Tabelle C.1 — Beispiele für die bei Auswertungen von Gleichung (C.7) verwendeten Zahlenwerte der Anpassungskoeffizienten $\alpha_2$ , $\alpha_4$ und $\alpha_6$ für eine Diode PTW 60008 in 15 cm Tiefe. Die Anpassung erfolgte im Bereich $-6,5 \text{ mm} \leq x \leq +6,5 \text{ mm}$ .....	66
Tabelle C.2 — Beispiele für die bei Auswertungen der Gleichung (C.8) verwendeten Zahlenwerte der Anpassungskoeffizienten $\beta_2$ , $\beta_4$ und $\beta_6$ für eine PTW 31010 SemiFlex in 15 cm Tiefe. Die Anpassung erfolgte im Bereich $-6,5 \text{ mm} \leq x \leq +6,5 \text{ mm}$ .....	66

<b>Tabelle C.3 — Beispiele von Störungsfaktoren <math>p_v</math> von Ionisationskammern, berechnet für das Maximum des rotationssymmetrischen Dosisprofils eines roboter-geführten Beschleunigers bei 6 MV in 1,5 cm Wassertiefe bei verschiedenen Kollimator-Durchmessern [104].....</b>	<b>68</b>
<b>Tabelle D.1 — Parameter für die analytische Darstellung des totalen Streufaktors <math>S_{cp}</math> in Wasser .....</b>	<b>72</b>
<b>Tabelle E.1 — Dosismessung im kleinen Kalibrierfeld.....</b>	<b>77</b>
<b>Tabelle E.2 — Kalibrierung einer Diode im kleinen Kalibrierfeld .....</b>	<b>78</b>
<b>Tabelle E.3 — Dosismessung mit einer Diode unter Nicht-Kalibrierbedingungen (NKK) .....</b>	<b>79</b>