



Schweizerische Gesellschaft für Strahlenbiologie und Medizinische Physik
Société Suisse de Radiobiologie et de Physique Médicale
Società Svizzera di Radiobiologia e di Fisica Medica

Swiss Society of Radiobiology and Medical Physics

Member of the European Federation of Organisations for Medical Physics (EFOMP) and the International Organization for Medical Physics (IOMP)

Dosimetrie hochenergetischer Elektronenstrahlung mit Ionisationskammern

(Empfehlungen)

Nr. 10

Februar 2002

ISBN 3-908 125 31-6

Dosimetrie hochenergetischer Elektronenstrahlung mit Ionisationskammern

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung.....	3
2	Gesetzliche Grundlagen.....	4
2.1	Größen und Einheiten.....	4
2.2	Eichung und Anwendung von Dosimetern.....	4
3	Ionisationskammern, Phantome und wasserdichte Schutzkappen.....	5
4	Spezifikation der Strahlenqualität.....	6
4.1	Wahl des Strahlenqualitäts-Indexes.....	6
4.2	Messung der Strahlenqualität.....	6
5	Bestimmung der Wasser-Energiedosis.....	7
5.1	Referenzbedingungen.....	7
5.2	Wasser-Energiedosis in der Referenztiefe.....	8
5.2.1	Korrektur k_{TP} der Luftdichte.....	8
5.2.2	Korrektur k_S der Ionenrekombination.....	9
5.2.3	Korrektur des Polaritätseffektes.....	9
5.2.4	Bestimmung von $N_{W,Q}$ für die Strahlenqualität Q	10
6	Kalibrierung eines Gebrauchsdosimeters.....	11
6.1	Bestimmung des Kalibrierfaktors.....	11
6.2	Bestimmung des Kontrollstroms mit der Prüfquelle.....	11
7	Typische Unsicherheiten bei der Bestimmung der Wasser-Energiedosis.....	12
Anhang 1	Bestimmung der Tiefendosisverteilung aus der Messung der Tiefenionendosis.....	13
Anhang 2	Messungen mit der radioaktiven Prüfquelle.....	14
Anhang 3	Messung der Korrektur k_S der Ionenrekombination.....	15
Anhang 4	Liste der Symbole.....	16
Anhang 5	Referenzliste.....	17
Anhang 6	Mitglieder der Arbeitsgruppe.....	18

1 Einleitung

Der Zweck dieser Empfehlungen „Dosimetrie hochenergetischer Elektronenstrahlung mit Ionisationskammern“ ist es, dem Anwender Richtlinien zur Verfügung zu stellen, um seine Dosimetrie auf ein Referenz-Dosimetersystem abzustützen, das in Wasser-Energiedosis kalibriert und beim Bundesamt für Metrologie und Akkreditierung (METAS) geeicht worden ist.

Die Struktur dieser Empfehlungen ist die folgende: Im Kapitel „Gesetzliche Grundlagen“ werden die wichtigsten Rechtsgrundlagen betreffend Dosimetrie erwähnt. Unter „Ionisationskammern, Phantome und wasserdichte Schutzkappen“ werden Empfehlungen für die Geräteausrüstung abgegeben. Das Kapitel „Spezifikation der Strahlenqualität“ definiert die Angabe der Strahlenqualität und beschreibt ihre Messung. Im Kapitel „Bestimmung der Wasser-Energiedosis“ wird beschrieben, wie die Dosis bestimmt wird und wie die Korrekturfaktoren zu diesem Zweck erhalten werden. Im Kapitel „Kalibrierung eines Gebrauchsdosimeters“ werden Empfehlungen für die Kalibrierung eines Dosimeters rückverfolgbar bis zum nationalen Normal abgegeben. Die Unsicherheiten dieser Messungen werden im Kapitel 7 diskutiert.

Bei der Vorbereitung der vorliegenden Empfehlungen wurde beschlossen, auf internationalen Richtlinien aufzubauen, speziell auf jenen der Internationalen Atomenergie-Agentur (IAEA). Die Empfehlungen entsprechen vollumfänglich den neuen Verfahrensregeln von IAEA [1].

Neben dem Anschluss an Normale der Wasser-Energiedosis ist die wichtigste Änderung gegenüber der gegenwärtigen Praxis [2] die Verwendung einer neuen Referenztiefe. Durch diese Tiefe konnte der Einfluss spektraler Unterschiede zwischen verschiedenen Beschleunigern wie auch durch die Elektronen- und Photonen-Kontamination im klinischen Elektronenstrahl signifikant reduziert werden [3]. Vereinfachend werden die Strahlenqualitäten und alle davon abhängigen Faktoren (inklusive die neue Referenztiefe) nur noch als Funktion der Halbwertstiefe R_{50} ausgedrückt. Die Strahlenergie wird nicht mehr verwendet. Diese Änderung folgt der langjährigen Praxis in der Photonendosimetrie, bei welcher Strahlenqualitäten mit Hilfe des Durchdringungsvermögens der Strahlung ausgedrückt werden.

Der Bereich der in diesem Dokument berücksichtigten Strahlenqualitäten ist:

hochenergetische Elektronenstrahlen mit R_{50} zwischen $1.75 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-2}$ und $8.54 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-2}$ ($E_0 \approx 5.5 \text{ MeV}$ bis 22.5 MeV).

Für die Dosimetrie von hochenergetischen Elektronen ersetzen diese Empfehlungen die Empfehlungen Nr. 4 (1992) [2] der Schweizerischen Gesellschaft für Strahlenbiologie und Medizinische Physik (SGSMP).

Für die Dosimetrie von hochenergetischen Photonenstrahlen sollte der Anwender den Empfehlungen Nr. 8 (2000) [4] der SGSMP folgen.

Die vorliegenden Empfehlungen vermitteln nur eine Methodik für die Bestimmung der Wasser-Energiedosis im Referenzpunkt. Die Dosimetrie in irgendeinem anderen Punkt ist nicht Gegenstand dieses Dokumentes. Die einzige Ausnahme ist die Bestimmung der Tiefendosiskurve auf dem Zentralstrahl (vgl. Anhang 1).

Die Anwendung dieser Empfehlungen in angemessener Weise liegt in der Verantwortung eines Medizin-Physikers mit Fachanerkennung.

2 Gesetzliche Grundlagen

Gültigkeit haben das Strahlenschutzgesetz vom 23. März 1991 [5], die Strahlenschutzverordnung vom 22. Juni 1994 [6], die Einheitenverordnung vom 23. November 1994 [7] und die Weisungen des METAS für Referenz-Dosimetersysteme in der Strahlentherapie, die im Jahre 2002 erneuert werden [8].

2.1 Grössen und Einheiten

In der Strahlentherapie ist die interessierende Grösse die Wasser-Energiedosis. In Übereinstimmung mit Artikel 13 der Einheitenverordnung wird die Energiedosis in Gray (Gy) gemessen.

2.2 Eichung und Anwendung von Dosimetern

Es wird zwischen zwei Arten von Dosimetern unterschieden:

- Referenzdosimeter; bestehend aus einer Ionisationskammer, einem Elektrometer und einer radioaktiven Prüfquelle.
- Gebrauchsdosimeter; ein Dosimetersystem mit einem vergleichbaren Aufbau, das in der Routinedosimetrie verwendet wird.

Teile des Referenzdosimetersystems können identisch mit Teilen eines Gebrauchsdosimeters sein. Es wird jedoch empfohlen, die Ionisationskammer des Referenzdosimetersystems nicht für die Routinedosimetrie zu verwenden.

Das Referenzdosimetersystem muss alle 4 Jahre geeicht werden, entsprechend den Weisungen des METAS [8]. Die autorisierte Behörde für die Eichung ist das METAS.

Der Medizinphysiker ist verantwortlich für die Überprüfung der Referenzdosimetersysteme und die Kalibrierung der Gebrauchsdosimetersysteme (Artikel 74 der Strahlenschutzverordnung).

Die wichtigsten Punkte dieser Weisungen sind: Das Referenzdosimetersystem wird bei einer Reihe von Strahlenqualitäten kalibriert, so dass jede verwendete Strahlenqualität Q zwischen zwei Strahlenqualitäten liegt, bei denen das Referenzdosimetersystem kalibriert wurde und welche nicht weiter als $2 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-2}$ voneinander entfernt liegen. Die minimale Anzahl von erforderlichen kalibrierten Punkten ist somit gegeben durch den Bereich und die Anzahl der verwendeten Strahlenqualitäten. Im Rahmen der Kalibrierung wird der bei Verwendung der Prüfquelle erzeugte Kontrollstrom in der Ionisationskammer gemessen. Ein Dosimeter kann geeicht werden, wenn die Unsicherheiten der Kalibrierfaktoren im Verlauf der Messungen für die Eichung nicht grösser als 3% sind bei einem Vertrauensniveau von 95%. Der Anwender muss die Konstanz des Dosimetersystems mindestens halbjährlich mit Hilfe der radioaktiven Prüfquelle, eines Thermometers und eines Barometers prüfen, wobei die Kalibrierung der beiden letzteren auf nationale Normale rückverfolgbar sein muss. Diese Kontrollen müssen dokumentiert werden. Die Abweichung des Prüfergebnisses von dem im Eichzertifikat aufgeführten Wert muss innerhalb von $\pm 1\%$ liegen (vgl. Anhang 2).

Das empfohlene Verfahren zur Kalibrierung eines Gebrauchsdosimeters besteht in einem Vergleich mit einem Referenzdosimeter, wie in Kapitel 6 beschrieben.

3 Ionisationskammern, Phantome und wasserdichte Schutzkappen

Es wird allgemein angenommen [9, 10], dass „well-guarded“ planparallele Ionisationskammern, wie NACP-02 von Scanditronix oder PTW 34001 nach Roos, eine vernachlässigbare Störung verursachen. Bei einer „well-guarded“ planparallelen Ionisationskammer ist die Sammelelektrode umgeben von einer Schutzelektrode, die eine Breite von mindestens 1.5 mal die Höhe des Messvolumens aufweist [10]. Diese Kammer werden somit für alle Strahlenqualitäten als Kammer eines Referenzdosimetersystems empfohlen. Als Referenzpunkt für planparallele Kammer wird das Zentrum auf der Innenseite des Strahleneintrittsfensters genommen. Dieser Punkt muss in der Referenztiefe im Phantom positioniert werden.

Die verwendeten Ionisationskammern sollten offen für die Umgebungsluft und im Gleichgewicht mit dem umgebenden Luftdruck sein.

Als Referenzmedium für die Messungen von Elektronenstrahlung wird Wasser empfohlen. Das Wasserphantom muss die vollständige Aufstreuung des Strahlungsfeldes gewährleisten und sollte an allen Seiten mindestens $5 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-2}$ grösser als das eingestellte Feld und $10 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-2}$ tiefer als das Kammerzentrum auf dem Zentralstrahl sein.

Im horizontalen Elektronenstrahl muss das Fenster des Phantoms aus PMMA oder Polystyren sein und eine Dicke t_{win} zwischen 0.2 cm und 0.5 cm aufweisen. Die wasseräquivalente Dicke des Phantomfensters (in $\text{g}\cdot\text{cm}^{-2}$) muss bei der Positionierung der Kammer in der gewünschten Messtiefe berücksichtigt werden. Die Dicke wird berechnet als Produkt $t_{\text{win}} \cdot \rho_{\text{pl}}$, wobei ρ_{pl} die Dichte des Kunststoffes (in $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$) bezeichnet. Für den üblicherweise verwendeten Kunststoff PMMA und klares Polystyren sollten die nominellen Werte von $\rho_{\text{PMMA}} = 1.19 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ und $\rho_{\text{polyst}} = 1.06 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ verwendet werden.

Für Strahlenqualitäten mit $R_{50} < 4 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-2}$ ($E_0 \leq 10 \text{ MeV}$) können PMMA-Phantome benutzt werden, jedoch wird ihre Verwendung zum Zweck der Referenzdosimetrie nicht empfohlen.

Für nicht wasserdichte Ionisationskammern muss eine gut angepasste wasserdichte Plastikschrutzkappe (aus Material mit niedriger Ordnungszahl Z, z.B. PMMA) verwendet werden. Die Schutzkappe sollte genügend dünn sein ($\approx 1.0 \text{ mm}$), um thermisches Gleichgewicht zwischen Kammer und Phantom innerhalb von typischerweise 2 bis 3 min pro Grad Temperaturdifferenz zu gewährleisten. Die Schutzkappe sollte eine Verbindung zur Umgebungsluft besitzen, damit es in der Kammer zu einem raschen Ausgleich mit dem Luftdruck der Umgebung kommen kann. Die Schutzkappe ist damit Bestandteil des Dosimeters und die Kalibrierfaktoren sind nur gültig, wenn die gleiche Schutzkappe wie bei der Kalibrierung beim METAS verwendet wird.

4 Spezifikation der Strahlenqualität

4.1 Wahl des Strahlenqualitäts-Indexes

Bei Elektronenstrahlen ist der Strahlenqualitäts-Index die Halbwertstiefe R_{50} in Wasser. Dies ist die Wassertiefe (in $\text{g}\cdot\text{cm}^{-2}$), bei welcher die Energiedosis 50% des Wertes im Dosismaximum beträgt, gemessen bei einer Quellpunkt-Oberflächen-Distanz von 100 cm und einer Feldgrösse an der Phantomoberfläche von mindestens 15 cm x 15 cm für alle Energien.

4.2 Messung der Strahlenqualität

Für alle Strahlenqualitäten ist die bevorzugte Detektorwahl für die Messung von R_{50} eine planparallele Kammer. Es wird dafür ein Wasserphantom verwendet. In einem vertikalen Strahlengang soll die Messrichtung gegen die Oberfläche erfolgen, um den durch die Oberflächenspannung des Wassers erzeugten Meniskuseffekt zu reduzieren.

Korrekturen der Ionenrekombination sind für alle Tiefen erforderlich. Diese können aus einem beschränkten Satz von repräsentativen Messungen abgeleitet werden, z.B. nahe der Oberfläche, im Ionendosis-Maximum und in den Tiefen, die 90% und 50% des Ionendosis-Maximums entsprechen.

Bei der Verwendung einer Ionisationskammer ist die Messgrösse des Ionisationsstroms die Halbwertstiefe $R_{50,\text{ion}}$. Diese entspricht der Wassertiefe (in $\text{g}\cdot\text{cm}^{-2}$), in welcher der Ionisationsstrom 50% des Maximalwertes beträgt. Die Halbwertstiefe R_{50} bezogen auf die Energiedosis wird wie folgt bestimmt [1, 11]:

$$R_{50} = 1.029 \cdot R_{50,\text{ion}} - 0.06 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-2}$$

Als Alternative zur Verwendung einer Ionisationskammer können andere Detektoren (Dioden, Diamant-Detektoren usw.) zur Bestimmung von R_{50} verwendet werden. In diesem Fall muss sich der Benutzer mittels Vergleichsmessungen mit einer Ionisationskammer bei einem Satz von repräsentativen Strahlenqualitäten versichern, dass der Detektor für Tiefendosismessungen geeignet ist.

5 Bestimmung der Wasser-Energiedosis

Um zuverlässige Werte zu erhalten, wird eine Stabilitätskontrolle des Dosimeters vor und nach jeder Messung unter Verwendung der radioaktiven Prüfquelle, des Thermometers und des Barometers (entsprechend Anhang 2) empfohlen.

5.1 Referenzbedingungen

Die Referenzbedingungen entsprechen jenen Bedingungen, für die der Kalibrierfaktor $N_{W,Q}$ für die Wasser-Energiedosis $D_{W,Q}$ eines Dosimeters angegeben ist.

Die Referenztiefe z_{ref} ist gegeben durch [1, 2]

$$z_{ref} = 0.6 \cdot R_{50} - 0.1 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-2} \quad (R_{50} \text{ in } \text{g} \cdot \text{cm}^{-2})$$

Für Strahlenqualitäten mit $R_{50} < 4 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-2}$ ($E_0 < 10 \text{ MeV}$) liegt diese Tiefe nahe bei der Tiefe z_{max} des Dosismaximums. Bei höheren Strahlenqualitäten ist sie grösser als z_{max} . Für einen bestimmten Beschleuniger werden keine zwei Referenzstrahlen die gleiche Referenztiefe aufweisen. Die neue Definition von z_{ref} führt aber zu einer signifikant geringeren Streuung der mit verschiedenen Linearbeschleunigern bestimmten Kalibrierfaktoren [3], und die verbesserte Genauigkeit rechtfertigt diese neue Definition, besonders für planparallele Kammertypen. Die Referenzbedingungen, auf die sich die Eichung des METAS bezieht, sind:

Temperatur T_0	293.15 K (20 °C)
absoluter Luftdruck p_0	1013.25 hPa
relative Feuchtigkeit rF	50%
Sättigung	100%
Spannung und Polarität	gemäss Eichzertifikat
Strahlenqualität	Q_C (vgl. Tabelle 1)
Quelle-Oberflächen-Distanz	100 cm
Feldgrösse	15 cm x 15 cm an der Phantomoberfläche
Kammer-Referenzpunkt	im Zentrum der Innenseite des Strahleintrittsfensters
Lage des Kammer-Referenzpunktes	in z_{ref}

Tabelle 1: Strahlenqualitäten des METAS

nominale Elektronenenergie [MeV]	Strahlenqualitätsindex Q_C (= R_{50}) [$\text{g} \cdot \text{cm}^{-2}$]	z_{ref} [$\text{g} \cdot \text{cm}^{-2}$]
5.5	1.75	0.95
6.0	1.95	1.07
7.5	2.62	1.47
9.0	3.31	1.89
10.0	3.70	2.12
12.0	4.35	2.51
15.0	5.67	3.30
18.0	6.90	4.04
20.5	7.52	4.41
22.5	8.54	5.02

5.2 Wasser-Energiedosis in der Referenztiefe

Die Wasser-Energiedosis in der Referenztiefe in Wasser für die Strahlenqualität Q und in Abwesenheit der Kammer ist gegeben durch:

$$D_{W,Q} = N_{W,Q} \cdot M_Q$$

$$M_Q = M \cdot k_{TP} \cdot k_S$$

wobei:

$D_{W,Q}$: Wasser-Energiedosis bei der Strahlenqualität Q am Ort des Kammerreferenzpunktes, wenn Kammer und allenfalls Schutzkappe durch Wasser ersetzt werden

k_{TP} : Korrektur der Luftdichte

k_S : Korrektur der Ionenrekombination (Sättigungskorrektur)

$N_{W,Q}$: Kalibrierfaktor für die Strahlenqualität Q zur Umrechnung der Anzeige am Messinstrument in Wasser-Energiedosis

M_Q : korrigierte Anzeige des Dosimeters

M : unkorrigierte Anzeige des Dosimeters

5.2.1 Korrektur k_{TP} der Luftdichte

Für genaue Messungen ist es notwendig, jeglichen Unterschied zwischen der Luftdichte in der Kammer zur Zeit der Messung und der Luftdichte, auf die sich der Kalibrierfaktor bezieht, zu korrigieren. Der Faktor k_{TP} berücksichtigt den Einfluss von Lufttemperatur und Luftdruck auf die Luftdichte im offenen Kammervolumen:

$$k_{TP} = (p_0 \cdot T) / (p \cdot T_0)$$

T ist die Lufttemperatur in der Kammer, und p ist der gemessene Umgebungsdruck. Die Referenzwerte p_0 und T_0 sind im Kapitel 5.1 aufgeführt.

Bestimmung von k_{TP} durch Messung von T und p:

Im thermischen Gleichgewicht kann die Lufttemperatur T in der Kammer mit derjenigen des Wasserphantoms gleichgesetzt werden. Die Wassertemperatur sollte gemessen werden, da sie aufgrund der Verdunstung üblicherweise bis zu einem Grad unterhalb der Raumtemperatur liegt. Der Ort der Temperaturmessung sollte möglichst nahe beim Kammervolumen liegen. Thermisches Gleichgewicht zwischen der Ionisationskammer und dem Phantom wird typischerweise nach 2 bis 3 min pro Grad Temperaturdifferenz erreicht. Um Temperaturdrifts zu vermeiden, sollte das Phantom so gut wie möglich im thermischen Gleichgewicht mit seiner Umgebung sein. Um eine homogene Temperaturverteilung zu erreichen, wird empfohlen, das Wasser vor Beginn einer Messung umzurühren.

Die für diese Messungen benutzten Thermometer und Barometer sollten auf nationale Normale rückverfolgbar kalibriert worden sein.

Es ist schwierig, die relative Luftfeuchtigkeit in einer Kammer zu bestimmen, speziell wenn sie in ein Wasserphantom eingetaucht ist. Die Korrektur für einen Unterschied zwischen der Feuchtigkeit zur Zeit der Messung und der relativen Feuchtigkeit von 50%, auf die sich der Kalibrierfaktor bezieht, ist jedoch klein (<0.1%) für relative Feuchtigkeiten zwischen 20% und 70% sowie Temperaturen zwischen 15 °C und 25 °C. Sie kann somit vernachlässigt werden.

Bestimmung von k_{TP} durch Verwendung der radioaktiven Prüfquelle:

Eine andere Methode zur Bestimmung des Korrekturfaktors für die Luftdichte ist die Messung des Anzeigewertes der Prüfquelle vor und nach der eigentlichen Messung und der Vergleich des Mittelwertes mit dem auf das Messdatum korrigierten Referenzwert (Aktivitätsabnahme der Prüfquelle).

Damit gilt:

$$k_{TP} = (M_k / M_m) \cdot \exp [-\ln 2 \cdot (t / T_{1/2})]$$

wobei:

M_k : im Eichzertifikat angegebener Wert für den Kontrollstrom mit der Prüfquelle

M_m : Mittelwert der beiden Kontrollstrommessungen mit der Prüfquelle am aktuellen Datum

$\exp[-\ln 2 \cdot (t / T_{1/2})]$: Zerfallsfaktor für die zwischen der Eichung und dem aktuellen Datum verstrichene Zeit t ($T_{1/2} = 28.7$ a für ^{90}Sr)

Diese Methode ergibt nur akzeptable Resultate, wenn die Temperatur in der Prüfvorrichtung und die Temperatur im Wasserphantom gleich sind. Im Falle eines Temperaturunterschieds ist ein Korrekturfaktor für den entsprechenden Luftdichteunterschied zu berücksichtigen.

5.2.2 Korrektur k_S der Ionenrekombination

Die unvollständige Sättigung infolge Ionenrekombination erfordert die Berücksichtigung eines Korrekturfaktors k_S . Die Korrektur hängt von der Geometrie der Ionisationskammer, von der angelegten Kammer Spannung und von der Dosis pro Beschleunigerpuls ab. Bei gepulster Strahlung - besonders bei Punktbestrahlung (scanned beams) - erhält der Korrekturfaktor für die Rekombination erhebliche Bedeutung, weshalb eine Korrektur für die Ionenrekombination erfolgen sollte.

Ausführliche Angaben zur Sättigung einer Ionisationskammer können in der zugehörigen Anleitung gefunden werden.

Eine Messmethode für die Bestimmung des Korrekturfaktors für die Ionenrekombination wird in Anhang 3 beschrieben.

5.2.3 Korrektur des Polaritätseffektes

Es wird empfohlen, das Dosimeter mit der gleichen Polarität und Spannung wie bei der Eichung zu benutzen. Damit muss im klinischen Betrieb keine Polaritätskorrektur durchgeführt werden, da diese implizit im Kalibrierfaktor enthalten ist.

5.2.4 Bestimmung von $N_{W,Q}$ für die Strahlenqualität Q

Der Kalibrierfaktor für die Strahlenqualität Q_C , bei welcher das Dosimeter im Rahmen der Eichung kalibriert worden ist, beträgt N_{W,Q_C} (wie im Eichzertifikat angegeben).

Wenn beim Anwender die Strahlenqualität Q verschieden ist von allen Strahlenqualitäten, bei welchen das Dosimeter im Rahmen der Eichung kalibriert worden ist, so muss ein der Strahlenqualität Q entsprechender Kalibrierfaktor $N_{W,Q}$ nach dem folgenden Verfahren bestimmt werden:

Wenn die Zahl der verfügbaren Kalibrierfaktoren 4 nicht übersteigt, wird der neue Kalibrierfaktor $N_{W,Q}$ mittels linearer Interpolation zwischen den Kalibrierfaktoren der beiden nächstgelegenen Strahlenqualitäten, deren Werte dem Eichzertifikat entnommen werden können, ermittelt.

Wenn die Zahl der verfügbaren Kalibrierfaktoren 4 übersteigt, soll der neue Kalibrierfaktor $N_{W,Q}$ wie folgt berechnet werden:

$$N_{W,Q} = a \cdot R_{50}^3 + b \cdot R_{50}^2 + c \cdot R_{50} + d$$

Die Koeffizienten a, b, c und d werden mit Hilfe eines Least-Squares-Fits aus dem Set der Kalibrierfaktoren gebildet, die dem Eichzertifikat entnommen werden.

6 Kalibrierung eines Gebrauchsdosimeters

6.1 Bestimmung des Kalibrierfaktors

Das empfohlene Vorgehen für die Kalibrierung eines Gebrauchsdosimeters durch Vergleich mit einem Referenzdosimeter ist das folgende:

- 1) Durchführung des Vergleichs am gleichen Beschleuniger und bei der gleichen Strahlenqualität wie bei den nachfolgenden Messungen mit dem Gebrauchsdosimeter.
- 2) Messung des Qualitätsindex für jede Strahlenqualität, um den anzuwendenden Kalibrierfaktor des Referenzdosimeters auszuwählen.
- 3) Vergleich des Referenzdosimeters und des Gebrauchsdosimeters durch gleichzeitige Bestrahlung in einem geeigneten Wasserphantom. Der Vergleich sollte bei Referenzbedingungen ausgeführt werden, wie sie im Kapitel 5.1 beschrieben sind. Dabei ist ein geeigneter Abstand zwischen den Kammerzentren und ein äquidistanter Abstand jeder Kammer von der Strahlachse zu beachten.
- 4) Um den möglichen Einfluss einer Feldinhomogenität auf den Kalibrierfaktor zu reduzieren, sollten die Kammern vertauscht und die Ablesungen wiederholt werden.
Falls die Kammern nicht gleichzeitig gemessen werden können, so können sie nacheinander gemessen werden, wobei sie auf der Strahlachse zentriert werden müssen.
- 5) Es sind die gleichen wasserdichten Schutzkappen für die Referenzkammer zu benutzen (falls die Referenzkammer nicht wasserdicht ist) wie während der Eichung beim METAS. Entsprechend soll die bei der Kalibrierung verwendete wasserdichte Schutzkappe für die Gebrauchskammer bei allen nachfolgenden Messungen benutzt werden.
- 6) Die Anzeigewerte jedes Dosimeters müssen auf Referenzbedingungen korrigiert werden, wie im Kapitel 5.2 angegeben. Wenn die Kammern die identischen Temperaturen und Drucke aufweisen, fällt diese Korrektur weg (beachte die untenstehende Formel).

Der Kalibrierfaktor für das Gebrauchsdosimeter ist dann bestimmt durch:

$$N_{W,Q}^F = [(k_{TP}^R \cdot k_S^R \cdot M^R) / (k_{TP}^F \cdot k_S^F \cdot M^F)] \cdot N_{W,Q}^R$$

wobei die hochgestellten Zeichen R und F für Referenz- und Gebrauchsdosimeter stehen.

Wenn die Messbedingungen und die Dosimetertypen identisch sind, reduziert sich die Formel auf:

$$N_{W,Q}^F = (M^R / M^F) \cdot N_{W,Q}^R$$

6.2 Bestimmung des Kontrollstroms mit der Prüfquelle

Ein Referenzwert M_k^F für das Gebrauchsdosimeter muss auf die folgende Weise bestimmt werden:

$$M_k^F = M^F \cdot k_{TP}$$

wobei:

M^F : Anzeige des Gebrauchsdosimeters bei Verwendung der Prüfquelle
 $k_{TP} = (p_0 \cdot T) / (p \cdot T_0)$ (entsprechend Kapitel 5.2.1)

7 Typische Unsicherheiten bei der Bestimmung der Wasser-Energiedosis

Die Bestimmung der Unsicherheiten in diesen Empfehlungen folgt den Richtlinien der IAEA [1].

Wird ein Referenzdosimeter für die Bestimmung der Wasser-Energiedosis im Strahl des Anwenders benutzt, so lassen sich die Unsicherheiten der verschiedenen physikalischen Grössen oder Prozeduren, die zur Dosisbestimmung beitragen, in zwei Schritte einteilen. Schritt 1 berücksichtigt Unsicherheiten bis zur Kalibrierung des Referenzdosimeters beim Eichlabor in Bezug auf $N_{W,Q}$. Schritt 2 berücksichtigt die Bestimmung der Energiedosis im Strahl des Anwenders und enthält die Unsicherheiten im Zusammenhang mit der Messung im Referenzpunkt im Wasserphantom. Die quadratische Addition der einzelnen Unsicherheitsbeiträge führt zur gesamten Standardunsicherheit bei der Bestimmung der Wasser-Energiedosis im Referenzpunkt.

Die angegebenen Werte sind Standardunsicherheiten. Ein gemessener Wert und die entsprechende Unsicherheit bilden das Intervall, das die Werte der gemessenen Grösse mit einer Wahrscheinlichkeit von 68% enthält.

Typische Standardunsicherheiten sind die folgenden:

	Standardunsicherheit
Schritt 1: Eichlabor	
Kalibrierfaktor $N_{W,Qc}$	1.0%
Schritt 2: Anwender	
Dosimeter-Anzeige (inkl. Einflussgrössen) M_Q	0.8%
Experimentelles Verfahren und Stabilität des Dosimetriesystems	1.2%
gesamte Standardunsicherheit für $D_{W,Q}$	1.8%

Anhang 1 Bestimmung der Tiefendosisverteilung aus der Messung der Tiefenionendosis

Die mit einer Ionisationskammer gemessene Tiefenionendosis muss in die Energiedosis umgerechnet werden, wobei die mittlere Elektronenenergie am Messpunkt berücksichtigt werden muss. Die Tiefendosis-Messung mit einer planparallelen Ionisationskammer entlang der Zentralachse kann entsprechend dem Code of Practice der IAEA [1] (S. 185 – 186) umgerechnet werden.

Umrechnung der relativen Tiefenionendosis in die relative Tiefendosis

$$PDD(z) = M(z) \cdot s_{w,air}(R_{50},z)$$

PDD(z) prozentuale Tiefendosis in der Wassertiefe z

M(z) unkorrigierte Dosimeteranzeige mit der Ionisationskammer in der Wassertiefe z

$s_{w,air}(R_{50},z)$ Verhältnis des Massenbremsvermögens von Wasser zu Luft in Abhängigkeit von der Strahlenqualität R_{50} und von der Wassertiefe z

$s_{w,air}(R_{50},z)$ berücksichtigt die Abhängigkeit des Massenbremsvermögens der beteiligten Stoffe (Luft in der Ionisationskammer, Wasser als Phantommateriale) von der Elektronenenergie und dem Messort (Tiefe z). Die Werte für $s_{w,air}(R_{50},z)$ sind aus monoenergetischen Daten und Monte-Carlo-Simulationen berechnet worden [11] und können dem IAEA-Protokoll [1] (Tabelle 20, S. 99f) entnommen werden.

$s_{w,air}(R_{50},z)$ kann auch mit Hilfe der folgenden, angepassten Formel ermittelt werden:

$$s_{w,air}(R_{50},z) = \frac{1.075 - 0.5087 \cdot x + 0.0887 \cdot x^2 - 0.084 \cdot y}{1 - 0.4281 \cdot x + 0.0646 \cdot x^2 + 0.00309 \cdot x^3 - 0.125 \cdot y}$$

wobei: $x = \ln(R_{50})$ und $y = z / R_{50} =$ relative Tiefe.

Der Tabellenbereich für $s_{w,air}(R_{50},z)$ ist beschränkt auf R_{50} von $1 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-2}$ bis $20 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-2}$ und auf die relative Tiefe z/R_{50} von 0.02 bis 1.2. Die Standardabweichung für die Anpassung beträgt 0.4%. Wie im IAEA-Protokoll [1] gehen wir davon aus, dass die Feldstörungskorrektur (Perturbations-Korrektur) unabhängig ist von der Messtiefe. Für eine "well guarded" planparallele Ionisationskammer ist diese Annahme gerechtfertigt.

Bestimmung der Energiedosis in einer Tiefe z aus der Energiedosis im Referenzpunkt z_{ref}

Die Energiedosis in der Tiefe z kann aus der Dosis in der Referenztiefe z_{ref} und aus der relativen Tiefendosis PDD(z) bestimmt werden:

$$D_{W,Q}(z) = D_{W,Q}(z_{ref}) \cdot PDD(z) / PDD(z_{ref})$$

Die Energiedosis im Dosismaximum (z_{max}) beträgt:

$$D_{W,Q}(z_{max}) = D_{W,Q}(z_{ref}) \cdot PDD(z_{max}) / PDD(z_{ref})$$

Mit einem Diamant-Detektor oder einer Halbleiter-Diode kann direkt die Energiedosisverteilung in Wasser gemessen werden. In diesem Fall sollten aber in Übereinstimmung mit dem IAEA-Protokoll [1] (S. 88) die Tiefendosisverteilungen mit denjenigen, welche mit einer Ionisationskammer bestimmt wurden, verglichen werden.

Anhang 2 Messungen mit der radioaktiven Prüfquelle

Eine Stabilitäts-Prüfquelle besteht üblicherweise aus einer oder mehreren radioaktiven Quellen (häufig in Form von Folien), die in einem abgeschirmten Behälter untergebracht sind, und die in eine feste geometrische Beziehung mit der Ionisationskammer gebracht werden können. Das üblicherweise verwendete Radionuklid ist ^{90}Sr .

Die Prüfquelle ist normalerweise für einen bestimmten Kammertyp ausgelegt. Oft findet man Änderungen im Ionisationsstrom, wenn die Kammer rotiert wird. Sollte dies der Fall sein, so ist üblicherweise durch den Hersteller auf dem Kammerstiel eine Marke eingraviert, die auf die entsprechende Markierung auf dem Behälter der Prüfquelle ausgerichtet werden sollte.

Wenn die Stabilitäts-Prüfquelle kurz vor ihrem Einsatz Temperaturbedingungen ausgesetzt war, die sich von denjenigen am Messort unterscheiden, dann muss genügend lang gewartet werden, bis sie die neue Temperatur erreicht hat; dies kann einige Stunden dauern. Um ihre Temperatur zu kontrollieren, sollte die Prüfquelle mit einem Thermometer ausgerüstet sein, dessen Kalibrierung auf nationale Normale rückverfolgbar sein sollte.

Nach der Montage der Kammer auf die Prüfquelle sollte so lange gewartet werden, bis sich die Anzeige stabilisiert hat und die Kammer im thermischen Gleichgewicht mit der Prüfquelle ist; etwa 10 min sollten üblicherweise ausreichen.

Die Eichung des Referenzdosimeters wird ungültig, wenn - nach Korrektur der Luftdichte und des radioaktiven Zerfalls der Quelle - die Ergebnisse um mehr als 1% von dem im Eichzertifikat angegebenen Strom der Prüfquelle abweichen. Falls sich der Grund für die Diskrepanz nicht feststellen und korrigieren lässt, muss das Dosimeter wieder geeicht werden.

Anhang 3 Messung der Korrektur k_S der Ionenrekombination

Bei gepulstem Strahl eines typischen Linearbeschleunigers in einem Spital kann die Korrektur der Ionenrekombination 1% oder mehr betragen. Sie sollte nicht vernachlässigt und alle Ablesungen sollten korrigiert werden.

Der Korrekturfaktor k_S der Ionenrekombination für gepulste Strahlung ist abhängig von der Kammergeometrie, der angelegten Spannung und der Dosis pro Beschleunigerpuls.

In der Nähe vollständiger Sättigung ($k_S < 1.05$) führt die Ionenrekombination zu einer annähernd linearen Beziehung zwischen $1/M$ und $1/U$. M ist die Dosimeteranzeige und U die Kammer-spannung. Für die Bestimmung der Korrektur der Ionenrekombination wird der Ionisationsstrom (oder die Ladung) bei verschiedenen Spannungen gemessen und anschliessend $1/M$ als Funktion von $1/U$ aufgezeichnet. Der reziproke Wert des Schnittpunktes einer durch die Messpunkte gelegten Geraden mit der Achse $1/M$ entspricht dann der Anzeige M_S unter vollständiger Sättigung. Der entsprechend anzuwendende Korrekturfaktor beträgt somit:

$$k_S = M_S / M$$

wobei M die Dosimeterablesung bei der üblicherweise verwendeten Kammer-spannung ist.

Anhang 4 Liste der Symbole

$D_{W,Q}$: Wasser-Energiedosis bei der Strahlenqualität Q
E_0	: mittlere Energie eines Elektronenstrahls an der Phantom-Oberfläche
F	: (als hochgestelltes Zeichen) Gebrauchsdosimeter
k_{TP}	: Korrektur der Luftdichte
k_S	: Korrektur der Ionenrekombination (Sättigungskorrektur)
M	: unkorrigierte Dosimeteranzeige
M_Q	: korrigierte Dosimeteranzeige
M_k	: Referenzwert für die Anzeige mit der Prüfquelle (Dosimeteranzeige bei Verwendung der radioaktiven Prüfquelle)
M_m	: Mittelwert der Dosimeteranzeigen mit der Prüfquelle (Dosimeteranzeige bei Verwendung der radioaktiven Prüfquelle)
M_S	: Dosimeteranzeige bei vollständiger Sättigung
$M(z)$: unkorrigierte Dosimeteranzeige mit der Ionisationskammer in der Wassertiefe z
$N_{W,Q}$: Kalibrierfaktor für die Umrechnung der Dosimeteranzeige auf Wasser-Energiedosis bei der Strahlenqualität Q
N_{W,Q_C}	: im Rahmen der Eichung bestimmter Kalibrierfaktor für die Umrechnung der Dosimeteranzeige in Wasser-Energiedosis bei der Strahlenqualität Q_C
p, p_0	: absoluter Luftdruck während der Messung bzw. unter Referenzbedingungen
$PDD(z)$: prozentuale Tiefendosis in der Wassertiefe z
Q	: Strahlenqualitätsindex (entspricht R_{50})
Q_C	: Strahlenqualität, bei der das Referenzdosimetersystem im Rahmen der Eichung kalibriert wurde
R	: (als hochgestelltes Zeichen) Referenzdosimeter
R_{50}	: Wassertiefe, bei welcher die Energiedosis 50% des Wertes im Dosismaximum beträgt
$R_{50,ion}$: Wassertiefe, bei welcher der Ionisationsstrom 50% des Wertes im Maximum beträgt
rF	: relative Luftfeuchtigkeit
SSD	: Quelle-Oberflächen-Distanz
$s_{w,air}(R_{50},z)$: Verhältnis des Massenbremsvermögens von Wasser zu Luft in Abhängigkeit von der Strahlenqualität R_{50} und von der Wassertiefe z
t	: Zeit zwischen dem Referenzdatum der Eichung und dem Messdatum
t_{win}	: Dicke des Phantom-Eintrittsfensters
$T_{1/2}$: Halbwertszeit für ^{90}Sr (28.7 a)
T, T_0	: absolute Temperatur während der Messung bzw. unter Referenzbedingungen
U	: polarisierte Kammerspannung
z	: Wassertiefe
z_{max}	: Tiefe des Dosismaximums
z_{ref}	: Referenztiefe in Wasser

Anhang 5 Referenzliste

- [1] IAEA, Technical Report Series No. 398
Absorbed Dose Determination in External Beam Radiotherapy Based on Absorbed-Dose-to-Water Standards: An International Code of Practice for Dosimetry. Vienna, 2000
- [2] Schweizerische Gesellschaft für Strahlenbiologie und Medizinische Physik
Dosimetrie von hochenergetischer Photonen- und Elektronenstrahlung. Empfehlung Nr. 4, 1992
- [3] D.T. Burns et al.: R_{50} as a beam quality specifier for selecting stopping-power ratios and reference depths for electron dosimetry. Med. Phys. 23(3), March 1996, 310-320
- [4] Schweizerische Gesellschaft für Strahlenbiologie und Medizinische Physik
Dosimetrie hochenergetischer Photonenstrahlung. Empfehlung Nr. 8, 2000
- [5] Strahlenschutzgesetz, 23. März 1991
- [6] Strahlenschutzverordnung, 22. Juni 1994
- [7] Einheitenverordnung, 23. November 1994
- [8] METAS
Weisungen über den Aufbau, die messtechnischen Eigenschaften und die Eichung von ortsunabhängigen Referenz-Dosimetersystemen für die Strahlentherapie. Erneuert 2002
- [9] M.R. McEwen et al.: Determination of absorbed dose calibration factors for therapy level electron beam ionization chambers. Phys. Med. Biol. 46 (2001), 741–755
- [10] IAEA, Technical Report Series No. 381
The Use of Plane Parallel Ionisation Chambers in High Energy Electron and Photon Beams: An International Code of Practice for Dosimetry. Vienna, 1997
- [11] G. X. Ding et al.: Calculation of stopping-power ratios using realistic clinical electron beams. Med. Phys. 22 (5), 489-501, May 1995

Anhang 6 Mitglieder der Arbeitsgruppe

J.-F. Germond, Hôpital Communal, 2300 La Chaux-de-Fonds

R. Moning, Bundesamt für Metrologie und Akkreditierung, 3003 Bern-Wabern

J. Roth, Radiologische Physik, Kantonsspital, 4031 Basel

G. Stucki, Bundesamt für Metrologie und Akkreditierung, 3003 Bern-Wabern

J.-F. Valley, Institut Universitaire de Radiophysique Appliquée, 1007 Lausanne