

DIN 6801-1

ICS 17.240

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

Procedures of dosimetry with probe-type detectors for proton and ion radiation –
Part 1: Ionization chambers

Procédures de dosimétrie avec détecteurs de type sonde pour les rayonnements protoniques
et ionisants –
Partie 1: Chambres d'ionisation

Gesamtumfang 71 Seiten

DIN-Normenausschuss Radiologie (NAR)

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 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 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 Kompaktkammern bei der Kalibrierung und bei der Messung	31
7.6 Korrektionsfaktor k_{PMMA} für den Einfluss der Fluenzänderung bei Verwendung eines 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}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_{Co} -Werten für Kompaktkammern aus dem internationalen Dosimetrieprotokoll TRS 398	46
Anhang B (informativ)	Herleitung und Berechnung des Korrektionsfaktors k_T	48
Anhang C (normativ)	Erforderliche Umrechnungen und Korrektion zur Bestimmung der Wasser-Energiedosis in einem PMMA-Phantom	49
C.1	Allgemeines	49
C.2	Grundsätzliches	49
C.3	Zahlenwerte	50
C.3.1	Massendichte ρ_{PMMA}	50
C.3.2	Tiefenskalierungsfaktoren c_{PMMA} und f_{PMMA}	50
C.3.3	Korrektionsfaktor k_{PMMA} zur Berücksichtigung des Einflusses der Fluenzänderung bei der Verwendung eines PMMA-Phantoms statt eines Wasserphantoms	51
C.3.4	Zusammenfassung	53
Anhang D (informativ)	Zur Positionierung des Bezugspunkts von Kompaktkammern bezüglich der Messtiefe bei Protonen- und Ionenstrahlung	54
D.1	Allgemeines	54
D.2	Analytische Berechnung des Verschiebungsparameter p bei Vernachlässigung der 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 Verhältnis der Massen-Stoßbremsvermögen von Wasser zu Luft	60
F.1	Massen-Stoßbremsvermögen	60
F.2	Bedeutung des mittleren Ionisationspotenzials des Targetmaterials für das 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 Wasser zu Luft	64

Literaturhinweise.....	67
Stichwortverzeichnis.....	70

Bilder

Bild 1 — Prozentuale Tiefendosisverteilung von Protonenstrahlung mit einer Anfangsenergie von 235 MeV und einer Energiemodulation mit Hilfe eines mechanischen Modulators	11
Bild 2 — Berechnete Tiefendosiskurve von ^{12}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_{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 kQ'' - Werte für ausgewählte Flachkammern	45
Tabelle A.4 — Innenradius r, und Werte für k_r, $p_{Co}^{[DIN]}$ sowie kQ'' 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

Vorwort

Diese Norm wurde vom DIN-Arbeitsausschuss NA 080-00-01 AA „Dosimetrie“ des Normenausschusses Radiologie (NAR) in Arbeitsgemeinschaft mit der Deutschen Röntgengesellschaft und in Zusammenarbeit mit der Deutschen Gesellschaft für Medizinische Physik, der Deutschen Gesellschaft für Nuklearmedizin sowie der Deutschen Gesellschaft für Radioonkologie erarbeitet.

Mit „Protonen- und IONENSTRAHLUNG“ werden die für die STRAHLENTHERAPIE und/oder Strahlenbiologie eingesetzten KORPUSKULARSTRAHLUNGEN bezeichnet. Sie umfassen die Protonen und Ionen mit höherer Masse. In der Literatur werden diese auch unter der Bezeichnung „Hadronen“ zusammengefasst.

In der STRAHLENTHERAPIE werden neben herkömmlichen Strahlungsarten wie Photonen- und Elektronenstrahlung zunehmend auch Protonen- und Ionenstrahlung zur kurativen Behandlung von Tumorerkrankungen eingesetzt. Die begleitenden Aufgaben in der Dosimetrie dieser Strahlungsarten werden zurzeit üblicherweise nach einer Empfehlung der Internationalen Atomenergiebehörde "Absorbed Dose Determination in External Beam Radiotherapy. An International Code of Practice for Dosimetry Based on Standards of Absorbed Dose to Water" (TRS 398, [16]) durchgeführt. In der vorliegenden Norm werden diese Regeln übernommen, ergänzt und an die in Normen festgelegte Terminologie angepasst.

Definierte Begriffe werden in Übereinstimmung mit dem Verfahren bei IEC in KAPITÄLCHEN geschrieben. Ein Stichwortverzeichnis am Ende der Norm enthält alle definierten Begriffe einschließlich Quellenangabe und englischer Übersetzung.

Es wird auf die Möglichkeit hingewiesen, dass einige Texte dieses Dokuments Patentrechte berühren können. DIN ist nicht dafür verantwortlich, einige oder alle diesbezüglichen Patentrechte zu identifizieren.

DIN 6801 besteht unter dem allgemeinen Titel *Dosismessverfahren nach der Sondenmethode für Protonen- und Ionenstrahlung* aus folgenden Teilen:

— Teil 1: Ionisationskammern

Einleitung

Es stellt sich die Frage, ob für die überschaubare Anzahl von Protonen- und/oder Ionentherapieanlagen überhaupt eine spezielle Dosimetrie-Norm erforderlich ist, die über die Empfehlungen des internationalen Dosimetrieprotokolls TRS 398 [16] hinausgeht. Für eine spezielle Dosimetrie-Norm können die folgenden Aspekte angeführt werden:

- Es gibt gegenwärtig in Deutschland sechs klinisch eingesetzte Protonen/Ionen-Anlagen; es wird erwartet, dass in Zukunft weitere Anlagen hinzukommen. Für diese Anlagen sollten einheitliche Dosimetrieverfahren festgesetzt sein.
- Die in der TRS 398 [16] beschriebenen Verfahren erfordern zumindest an zwei Stellen eine Überarbeitung: dies sind die fehlenden Referenzbedingungen für monoenergetische Protonen- und/oder IONENSTRAHLUNG und die Bestimmung der Korrektur für den Sättigungseffekt allein nach der Zwei-Spannungsmethode. Hinzu kommt, dass neuere Untersuchungen über das Verhältnis der MASSEN-BREMSVERMÖGEN von Wasser zu Luft zur Verfügung stehen.
- Eine Angleichung der Empfehlungen der TRS 398 [16] an die bestehende Dosimetrie-Norm für Photonen und Elektronen erscheint wünschenswert. Beispiel hierfür sind die unterschiedliche Positioniervorschrift für Kompaktkammern und die unterschiedliche Definition für die Messtiefe in Wasser.

Die vorliegende Norm dient dem Zweck, diese Aspekte aufzugreifen. Aus Gründen internationaler Konsistenz in der Dosisbestimmung wurden die beschriebenen Methoden und Daten für PROTONEN- und IONENSTRAHLUNG zum großen Teil aus dem von der Internationalen Atomenergiebehörde (IAEA) herausgegebenen "International Code of Practice TRS 398" [16] übernommen.

Gleichzeitig wurde, so weit wie möglich, eine Angleichung an die Dosimetrie-Norm DIN 6800-2 [2] für Photonen und Elektronen angestrebt.

Weiterhin wurden Daten aus den ICRU Reports 49 [18] und 73 [20] verwendet.

Ein wichtiger Aspekt bei der Anwendung von Protonen- und Ionenstrahlung ist die Differenzierung zwischen der WASSER-ENERGIEDOSIS und der RBW (RELATIVE BIOLOGISCHE WIRKSAMKEIT)-GEWICHTETEN DOSIS. Letztere ist gleich der WASSER-ENERGIEDOSIS einer konventionellen Strahlung (Photonen- oder ELEKTRONENSTRAHLUNG) multipliziert mit dem RBW der verwendeten Protonen- und Ionenstrahlung. Dem entsprechend wird die RBW-GEWICHTETE DOSIS beim Einsatz von Ionenstrahlung in der Strahlentherapie zur Dosisverschreibung verwendet.

In dieser Norm bezieht sich die Ermittlung der Dosis ausschließlich auf die physikalisch definierte WASSER-ENERGIEDOSIS. Diese Einschränkung hat zwar den Nachteil, dass zur weiteren Bestimmung der RBW-GEWICHTETEN DOSIS die WASSER-ENERGIEDOSIS mit einem Faktor beaufschlagt werden muss, über den diese Norm keine Aussage trifft, sie hat jedoch den Vorteil, dass der Formalismus und die Methoden zur Dosisermittlung, die für Photonen- und Elektronenstrahlung nach DIN 6800-2 [2] eingeführt worden sind, in weitgehend ähnlicher Weise auch auf Protonen- und IONENSTRAHLUNG angewendet werden können. Die Ermittlung der WASSER-ENERGIEDOSIS von Protonen- und IONENSTRAHLUNG wird damit auf eine messtechnisch verlässliche und gut reproduzierbare Grundlage gestellt.

Weitere Vorteile sind:

- a) Der Dosismonitor kann bei einer Kalibrierung zur Messung der WASSER-ENERGIEDOSIS nach einer standardisierten und dieser Norm folgenden Methode funktionell geprüft werden,
- b) eine mit Hilfe der Bestrahlungsplanung berechnete Verteilung der WASSER-ENERGIEDOSIS kann standardisiert überprüft werden.

Bei dieser Methode der Dosisermittlung der Wasser-Energiedosis wird mit dieser Norm ein zuverlässiges Verfahren erreicht, das es gestattet, die Wirkung der STRAHLENTHERAPIE mit biologisch unterschiedlich wirkenden Strahlenarten fundiert vergleichen zu können. Darauf aufbauend müssen die biologischen Aspekte der Strahlenwirkung von Protonen- und IONENSTRAHLUNG bei der Verschreibung einer RBW-GEWICHTETEN DOSIS zusätzlich und auf weiteren Informationen basierend berücksichtigt werden. Dies ist insbesondere bei Ionenstrahlungen wegen der signifikant tiefenabhängigen Veränderung der RBW wichtig.

1 Anwendungsbereich

Diese Norm enthält Regeln zur Ermittlung der WASSER-ENERGIEDOSIS in Wasser und der WASSER-ENERGIEDOSISLEISTUNG in Wasser mit luftgefüllten Ionisationskammern nach dem Sondenverfahren bei Dosismessungen für die perkutane STRAHLENTHERAPIE mit Protonen- und IONENSTRAHLUNG mit Ordnungszahlen zwischen $Z = 2$ (Alphateilchen) und $Z = 10$ (Neon-Ionen).

Der Anwendungsbereich dieser Norm wird bezüglich der PRAKTISCHEN REICHWEITE in Wasser festgelegt. Bei Protonen umfasst dieser Bereich Werte zwischen 0,5 cm und 38 cm. Das entspricht näherungsweise einer Eintrittsenergie zwischen 25 MeV und 250 MeV. Bei Ionenstrahlung ist der Anwendungsbereich auf eine PRAKTISCHE REICHWEITE zwischen 1,0 cm und 30 cm festgelegt. Dies entspricht für ausgewählte, massenspezifizierte Ionen näherungsweise den in der 3. Spalte von Tabelle 1 enthaltenen Eintrittsenergien.

Messaufgaben beziehen sich auf die Messung der WASSER-ENERGIEDOSIS unter REFERENZBEDINGUNGEN und unter NICHT-REFERENZ-BEDINGUNGEN.

Allgemeine Regeln zum Sondenverfahren in der Dosimetrie enthält DIN 6800-1.

Anforderungen an Dosimeter mit IONISATIONSKAMMERN sind in DIN EN 60731 festgelegt.

Maßnahmen zur Qualitätssicherung in der Dosimetrie für die STRAHLENTHERAPIE sind in dieser Norm nicht enthalten.

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

Teilchenart	Grenzen der Anwendung	
	CSDA in Wasser cm	Energie pro Nukleon MeV ^a
Protonen	0,5 bis 38	25 bis 250
He-4	1,0 bis 30	35 bis 200
Li-7	1,0 bis 30	40 bis 250
Be-9	1,0 bis 30	40 bis 300
B-11	1,0 bis 30	50 bis 350
C-12	1,0 bis 30	60 bis 400
N-14	1,0 bis 30	60 bis 450
O-16	1,0 bis 30	70 bis 500
F-19	1,0 bis 30	70 bis 550
Ne-20	1,0 bis 30	80 bis 600

^a Die aufgelisteten Energiewerte wurden auf Vielfache von 5 MeV auf- bzw. abgerundet.

ANMERKUNG Berechnung der CSDA Reichweite nach Definition 3.19.3.

2 Normative Verweisungen

Die folgenden Dokumente werden im Text in solcher Weise in Bezug genommen, dass einige Teile davon oder ihr gesamter Inhalt Anforderungen des vorliegenden Dokuments darstellen. 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 6800-1, *Dosismessverfahren nach der Sondenmethode für Photonen- und Elektronenstrahlung — Teil 1: Allgemeines*

DIN 6800-2, *Dosismessverfahren nach der Sondenmethode für Photonen- und Elektronenstrahlung — Teil 2: Dosimetrie hochenergetischer Photonen- und Elektronenstrahlung mit Ionisationskammern*

DIN EN 60731, *Medizinische elektrische Geräte — Dosimeter mit Ionisationskammern zur Anwendung in der Strahlentherapie*

3 Begriffe

Für die Anwendung dieses Dokuments gelten die Begriffe im Stichwortverzeichnis und die folgenden Begriffe.

DIN und DKE stellen terminologische Datenbanken für die Verwendung in der Normung unter den folgenden Adressen bereit:

- DIN-TERMinologieportal: verfügbar unter <https://www.din.de/go/din-term>
- DKE-IEV: verfügbar unter <http://www.dke.de/DKE-IEV>

3.1

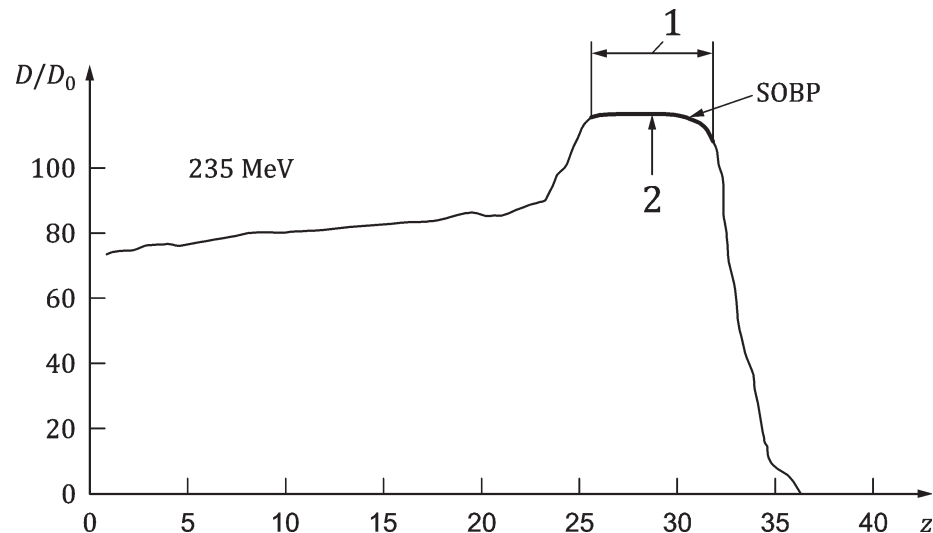
ausgedehnter BRAGG-PEAK

SOBP

(en: Spread-out Bragg-Peak)

in Einstrahlungsrichtung ausgedehntes Maximum einer Tiefendosisverteilung von Protonen- oder Ionenstrahlung, das durch die Überlagerung von Tiefendosisverteilungen für Teilchen mit jeweils unterschiedlicher Anfangsenergie (Energimodulation) entsteht

Anmerkung 1 zum Begriff: Ein ausgedehnter BRAGG-PEAK wird durch das Tiefenintervall, über das er sich erstreckt, und durch die Tiefenlage der Mitte des SOBP charakterisiert (siehe Bild 1).



Legende

D/D_0	Quotient aus Energiedosis in Wasser und deren Maximaldosis in Prozent
z	Tiefe in Wasser in cm
SOBP	ausgedehnter Bragg-Peak
1	Tiefenintervall
2	Tiefenlage der Mitte des SOBP

Bild 1 — Prozentuale Tiefendosisverteilung von Protonenstrahlung mit einer Anfangsenergie von 235 MeV und einer Energiemodulation mit Hilfe eines mechanischen Modulators

3.2

Bezugspunkt

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

Anmerkung 1 zum Begriff: Bei FLACHKAMMERN liegt der BEZUGSPUNKT in der Regel in der Grenzfläche zwischen dem Eintrittsfenster und dem Luftvolumen der IONISATIONSKAMMER, aus dem die Ionen gesammelt werden. Bei KOMPAKTKAMMERN liegt der BEZUGSPUNKT in der Regel auf der Symmetrieachse der IONISATIONSKAMMER.

3.3

Bragg-Peak

Maximum der Tiefendosisverteilung von Protonen- und Ionenstrahlung

Anmerkung 1 zum Begriff: Beim Durchgang durch Materie verlieren Protonen- und Ionenstrahlung ihre Energie durch vielfältige WECHSELWIRKUNGEN mit den Atomen und Molekülen der Materie. Zur Beschreibung dieses Energieverlustes dient der Begriff des LINEAREN BREMSVERMÖGENS. Das LINEARE BREMSVERMÖGEN und damit die deponierte Energie durchlaufen kurz vor dem Ende der REICHWEITE ein Maximum, und fallen dann abrupt ab. Dieses Maximum wird nach William Henry Bragg als BRAGG-PEAK bezeichnet.

Anmerkung 2 zum Begriff: Bild 1 und Bild 3 zeigen typische BRAGG-PEAKS für ^{12}C Ionen und für Protonen.

3.4

großflächige Kammer

spezielle Flachkammer zur Bestimmung der Tiefe des BRAGG-PEAKS von Protonen und IONENSTRAHLUNG

Anmerkung 1 zum Begriff: GROßFLÄCHIGE KAMMERN haben einen großen Durchmesser des empfindlichen Volumens von typischer Weise 8 cm bis 12 cm. Diese Eigenschaft erlaubt es, das Flächenintegral der Dosis über die Querschnittsfläche eines NADELSTRAHLS einer Protonen- und IONENSTRAHLUNG in Abhängigkeit von der Tiefe messen. Hierdurch erhält man eine von der Vielfachstreuung unabhängige Darstellung des Bragg-Peaks.

3.5

lineares Bremsvermögen S

Differentialquotient aus dem mittleren Energieverlust dE , den ein geladenes TEILCHEN mit der Energie E in einem betrachteten Stoff innerhalb der Weglänge ds durch eine oder mehrere WECHSELWIRKUNGEN erleidet, und der Weglänge ds

$$S = \frac{dE}{ds}$$

Anmerkung 1 zum Begriff: Für TEILCHENENERGIEN, bei denen Kernprozesse vernachlässigt werden können, ist das LINEARE BREMSVERMÖGEN gleich der Summe aus dem LINEAREN STOßBREMSVERMÖGEN S_{col} und dem LINEAREN STRAHLUNGSBREMSVERMÖGEN S_{rad}

$$S = S_{\text{col}} + S_{\text{rad}}$$

[QUELLE: DIN 6814-2:2000-07, 8.2.1, modifiziert — Definition und Anmerkung 1 zum Begriff sprachlich angepasst]

3.6

Massen-Bremsvermögen S/ρ

Quotient S durch ρ ; dabei ist S das LINEARE BREMSVERMÖGEN eines Stoffes und ρ dessen Dichte

[QUELLE: DIN 6814-2:2000-07, 8.2.1.1]

3.7

lineares Stoßbremsvermögen S_{col}

Quotient dE durch ds ; dabei ist dE der mittlere Energieverlust, den ein geladenes TEILCHEN mit der Energie E durch Kollisionen, das heißt durch Anregungen und IONISATIONEN, in einem betrachteten Stoff innerhalb der Weglänge ds erleidet, und ds die entsprechende Weglänge

$$S_{\text{col}} = \left(\frac{dE}{ds} \right)_{\text{col}}$$

[QUELLE: DIN 6814-2:2000-07, 8.2.2]

3.8

Massen-Stoßbremsvermögen S_{col}/ρ

Quotient S_{col} durch ρ ; dabei ist S_{col} das LINEARE STOßBREMSVERMÖGEN eines Stoffes und ρ dessen Dichte

[QUELLE: DIN 6814-2:2000-07, 8.2.2.1]

3.9

lineares Strahlungsbremsvermögen S_{rad}

Quotient dE durch ds ; dabei ist dE der mittlere Energieverlust, den ein geladenes TEILCHEN mit der Energie E durch BREMSSTRAHLUNGSERZEUGUNG in einem betrachteten Stoff innerhalb der Weglänge ds erleidet, und ds die entsprechende Weglänge

$$S_{\text{rad}} = \left(\frac{dE}{ds} \right)_{\text{rad}}$$

[QUELLE: DIN 6814-2:2000-07, 8.2.3]

3.10

effektiver Messpunkt

<Sondenmethode> Punkt einer IONISATIONSKAMMER, der bei Dosismessungen an den MESSORT zu bringen ist

Anmerkung 1 zum Begriff: Der Abstand zwischen dem EFFEKTIVEN MESSPUNKT einer IONISATIONSKAMMER und ihrem BEZUGSPUNKT wird als „Verschiebung des effektiven Messpunktes“ Δz (en: EPOM shift) bezeichnet. Der Zahlenwert von Δz hängt von der Bauweise des Detektors ab.

3.11

Energiemodulation

Variation der Energie von Protonen- und Ionenstrahlung

Anmerkung 1 zum Begriff: Die Tiefenausdehnung des BRAGG-PEAKS einer monoenergetischen Protonen- oder IONENSTRAHLUNG ist sehr klein. Sie beträgt bei Protonen etwa einen Zentimeter, bei Ionen nur wenige Millimeter. Man möchte in der Strahlentherapie den Hochdosisbereich des BRAGG-PEAKS jedoch für das gesamte Zielvolumen ausnutzen, dessen Tiefenausdehnung fast immer größer als die des BRAGG-PEAKS ist. Die ENERGIEMODULATION wird verwendet, um einen an das Zielvolumen angepassten SOBP zu erhalten.

Anmerkung 2 zum Begriff: Die technische Realisierung der ENERGIEMODULATION hängt von Beschleuniger-spezifischen Voraussetzungen zur Energievariation ab. Bei Zyklotronanlagen besitzt der Teilchenstrahl eine definierte konstante maximale Energie. Eine Veränderung (= Verringerung) der Energie kann daher nur durch Absorbermaterial unterschiedlicher Dicke im Strahlendurchgang erreicht werden. Dazu kann z. B. eine rotierende Scheibe mit variabler Dicke verwendet werden. Bei Synchrotronanlagen kann der extrahierte und zur Verfügung stehende Teilchenstrahl direkt auf eine innerhalb eines gewissen Energieintervalls vorgegebene Energie beschleunigt werden. Die ENERGIEMODULATION wird daher direkt durch die Energievorgabe an den Beschleuniger erreicht.

Anmerkung 3 zum Begriff: Ein besonderes Element der Energiemodulation ist das Ripple-Filter. Es besteht aus einer Scheibe aus Kunststoff mit einer typischen Dicke von 2 mm bis 4 mm, die mit feinen Rillen versehen ist. Unmittelbar hinter dem Strahlaustritt positioniert bewirkt die Scheibe durch die Feinstruktur der Rillen eine geringe Energiemodulation und damit eine definierte Verbreiterung des Bragg-Peaks. Ripple-Filter werden z. B. beim Raster-Scanning-Verfahren eingesetzt. Der Vorteil der Verwendung eines Ripple-Filters besteht darin, dass größere Energieintervalle und damit größere Reichweitenschritte gewählt und die Bestrahlungszeit um einen Faktor von typischerweise 2 bis 4 verkürzt werden können.

3.12

Flächendichte

flächenbezogene Masse

q

Quotient aus Masse und Fläche einer Materieschicht

Anmerkung 1 zum Begriff: Unter der Fläche einer Materieschicht wird nur die Vorderfläche verstanden.

Anmerkung 2 zum Begriff: Die Einheit der Flächendichte ist g cm^{-2} .

Anmerkung 3 zum Begriff: Eine normgerechte, jedoch selten angewandte äquivalente Bezeichnung ist flächenbezogene Masse.

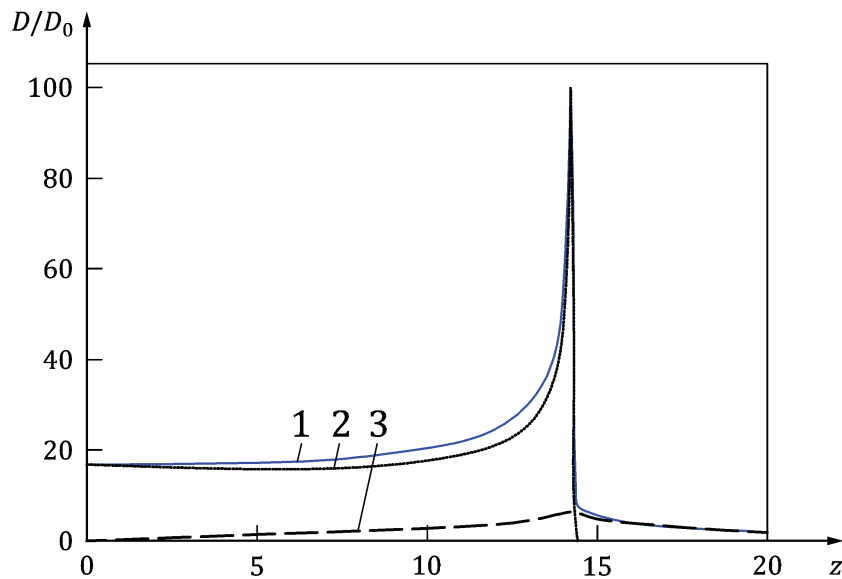
Anmerkung 4 zum Begriff: Die Flächendichte wird oft auch als Produkt ρx aus Dichte ρ und Dicke x angegeben.

3.13

Fragment

NUKLID als Bestandteil derjenigen Ionenstrahlung, die bei der Fragmentierung entsteht

Anmerkung 1 zum Begriff: FRAGMENTE haben eine geringere Ordnungszahl als das Projektil-Nuklid oder das Target-Nuklid. Die durch FRAGMENTIERUNG entstandenen Projektil-FRAGMENTE haben näherungsweise die gleiche Geschwindigkeit wie das Projektil-Nuklid. Der Energieverlust von FRAGMENTEN ist wegen des geringeren LINEAREN BREMSVERMÖGENS (gleiche Geschwindigkeit, jedoch geringere Masse und/oder Ordnungszahl) kleiner als der des Projektils. Damit haben FRAGMENTE eine größere Reichweite als das initiale Projektil-Nuklid. Dies bewirkt, dass bei Ionenstrahlung die Tiefendosisverteilung jenseits des Bragg-Peaks nicht auf null zurückgeht (SIEHE Bild 2). Im Unterschied dazu erhalten Target-FRAGMENTE nur eine sehr kleine Rückstoßenergie und tragen daher zur SPEKTRALEN TEILCHENFLUSSDICHTHE der Protonen oder IONENSTRAHLUNG praktisch nichts bei.



Legende

D/D_0	PDD in %
z	Tiefe in Wasser in cm
1	270 MeV Kohlenstoff-Ionen + Fragmente
2	nur C-12-Ionen
3	nur Fragmente

Bild 2 — Berechnete Tiefendosiskurve von ^{12}C Ionen in Wasser mit einer Eingangsenergie je Nukleon von 270 MeV

Bei der Berechnung der Tiefendosiskurve wurde die Seitenstreuung nicht berücksichtigt. Dies entspricht der Bedingung einer quasi-unendlichen Feldgröße.

3.14

Fragmentierung

WECHSELWIRKUNG von Ionenstrahlung mit den Nukliden eines Absorbermaterials, bei der sowohl aus dem Nuklid der IONENSTRAHLUNG als auch aus den Nukliden des Absorbermaterials weitere NUKLIDE entstehen

Anmerkung 1 zum Begriff: Die WECHSELWIRKUNGEN von Protonen- und IONENSTRAHLUNG mit den Atomen in einem bestrahlten Medium erfolgen überwiegend über Coulomb-WECHSELWIRKUNGEN (insbesondere mit den Elektronen der Hülle), zu einem kleineren Teil jedoch auch mit den Nukliden des Absorbermaterials in Form von Kernreaktionen.

3.15

Ionenstrahlung

KORPUSKULARSTRAHLUNG, die aus Atomkernen oder aus Ionen mit der Mindestmasse eines Deuterons, z. B. Deuteronen, Alphateilchen, ^{12}C -Ionen, besteht

[QUELLE: DIN 6814-2:2000-07, 3.4.1.3]

Anmerkung 1 zum Begriff: Alternativ werden für den Begriff der IONENSTRAHLUNG oft auch andere Ausdrücke, wie z. B. Schwerionen oder leichte Ionen, verwendet.

3.16**laterale Feldformung**

Methode, die bei Protonen- und IONENSTRAHLUNG zur Herstellung einer gewünschten FELDDGRÖÖE verwendet wird

Anmerkung 1 zum Begriff: Die aus dem Beschleuniger kommende Protonen- oder IONENSTRAHLUNG hat üblicherweise die Form eines NADELSTRAHLS. Zur Überdeckung der gesamten Fläche einer gewünschten FELDDGRÖÖE ist daher eine LATERALE FELDDFORMUNG erforderlich. Es werden zwei grundsätzlich unterschiedliche Verfahren für die LATERALE FELDDFORMUNG eingesetzt:

- a) Streuende Verfahren: Der NADELSTRAHL wird über ein Streufilter aufgeweitet und durch Blenden auf die gewünschte FELDDGRÖÖE begrenzt.
- b) Scannende Verfahren: Bei den sog. scannenden Strahlanwendungen wird der NADELSTRAHL direkt zur Strahlenbehandlung eingesetzt. Die LATERALE FELDDFORMUNG wird über ein magnetisches Ablenkungssystem erreicht.

3.17**Nadelstrahl**

die aus dem Beschleuniger kommende und für die STRAHLENTHERAPIE zur Verfügung stehende Protonen- und/oder IONENSTRAHLUNG

Anmerkung 1 zum Begriff: Der NADELSTRAHL hat normalerweise nur einen sehr kleinen Durchmesser (Größenordnung: 1 cm und kleiner, abhängig von Energie und Therapieanlage).

3.18**Nicht-Referenzbedingungen**

MESSBEDINGUNGEN, die von den Referenzbedingungen bei einer oder mehreren EINFLUSSGRÖÖEN abweichen

3.19**Reichweite**

durch Start- und Endpunkt der Teilchenbahn gegebene Eindringtiefe eines TEILCHENS in einem Medium, gemessen in seiner Startrichtung

Anmerkung 1 zum Begriff: Die Reichweite eines TEILCHENS ist kleiner als der von dem TEILCHEN zwischen Start- und Endpunkt seiner durch Streuprozesse beeinflussten Teilchenbahn zurückgelegte Weg. Bei Protonen und Ionen ist dieser Unterschied vernachlässigbar klein.

Anmerkung 2 zum Begriff: Die Reichweite wird in dieser Norm fast immer als Länge in cm angegeben; gelegentlich wird dafür auch die Flächendichte in g cm^{-2} verwendet. Wenn nicht anders angegeben, handelt es sich um die Reichweite in Wasser.

Anmerkung 3 zum Begriff: Es wird zwischen der PRAKTISCHEN Reichweite R_p , der Restreichweite R_{res} und der CSDA-Reichweite R_{CSDA} unterschieden.

3.19.1**praktische Reichweite**

R_p

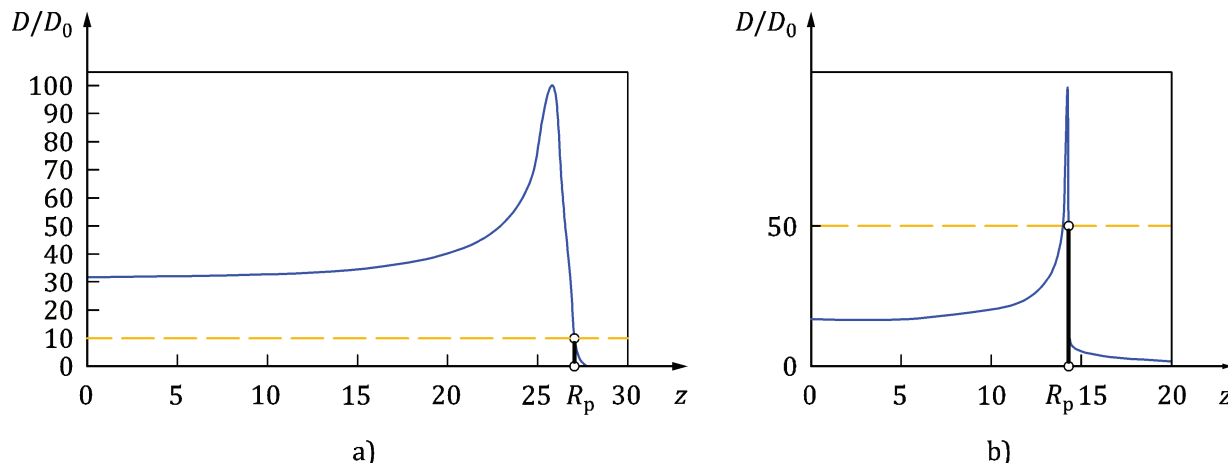
<Protonenstrahlung> Tiefe in Wasser, bei der der Wert der prozentualen Tiefendosisverteilung nach dem 100 % Wert (Bragg-Peak) auf 10 % abgefallen ist

<IONENSTRAHLUNG> Tiefe in Wasser, bei der der Wert der prozentualen Tiefendosisverteilung nach dem 100 % Wert (Bragg-Peak) auf 50 % abgefallen ist

Anmerkung 1 zum Begriff: Diese Definition bezieht sich auf die prozentuale Tiefendosisverteilung bei quasi-unendlicher Feldgröße. Das Bild 3 zeigt exemplarisch die PRAKTISCHE REICHWEITE von 200 MeV Protonen und 270 MeV Kohlenstoffionen.

Anmerkung 2 zum Begriff: Zur Definition der praktischen Reichweite für IONENSTRAHLUNG siehe Lühr A. et al. [24]. Neuere Werte zur praktischen Reichweite sind in Paganetti [30] und in Parodi [35] et al enthalten

Anmerkung 3 zum Begriff: Die Definition der praktischen Reichweite gilt auch für Tiefendosiskurven mit einem ausgedehnten Bragg-Peak.



Legende

D/D_0	PDD in %
z	Tiefe in Wasser in cm
R_p	PRAKTISCHE REICHWEITE

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

Anmerkung 4 zum Begriff: Die Berechnung der Protonenkurve erfolgte nach Bortfeld 1997[8]. Zur Berechnung der Ionenkurve siehe Definition des Begriffes FRAGMENT.

3.19.2

Restreichweite

R_{res}

Differenz aus praktischer Reichweite R_p und Messtiefe z

$$R_{res} = R_p - z$$

Anmerkung 1 zum Begriff: Die Gleichung gilt für Messtiefen, die kleiner als die PRAKTISCHE REICHWEITE ist. Für Messtiefen größer als die PRAKTISCHE REICHWEITE würde sich ein negativer Wert für die RESTREICHWEITE ergeben. Da negative Reichweiten begrifflich nicht sinnvoll sind, kann bei IONENSTRAHLUNG der jenseits der PRAKTISCHEN REICHWEITE durch Fragmentierung erzeugte Abschnitt der Tiefendosisverteilung hinsichtlich seiner Strahlungsqualität nicht durch die RESTREICHWEITE charakterisiert werden.

3.19.3

CSDA-Reichweite

$R_{CSDA,w}$

(en: Continuous Slowing Down Approximation, CSDA)

unter der Annahme des kontinuierlichen Energieverlusts berechnete Wegstrecke in Wasser

Anmerkung 1 zum Begriff: In dieser Näherung wird angenommen, dass Protonen und Ionen ihre kinetische Energie kontinuierlich entlang ihres Weges durch Wasser durch das STOßBREMSVERMÖGEN, $S(E)$ verlieren:

$$R_{\text{CSDA},w} = \int_0^{E_0} \frac{1}{S_w(E)} dE$$

Damit lässt sich die CSDA-REICHWEITE mit Hilfe des LINEAREN BREMSVERMÖGENS in Wasser berechnen, während im Gegensatz dazu die PRAKTISCHE REICHWEITE und die RESTREICHWEITE aus einer in Wasser gemessenen Tiefenverteilung ermittelt werden muss.

Anmerkung 2 zum Begriff: Die CSDA-REICHWEITE wird in cm angegeben.

Anmerkung 3 zum Begriff: In der Literatur und auch in der TRS 398 [16] wird die CSDA-REICHWEITE üblicherweise mit Hilfe des MASSEN-STOßBREMSVERMÖGENS berechnet und konsequenter Weise in g cm^{-2} angegeben.

3.20

RBW-gewichtete Dosis

D_{RBW}

Produkt der physikalisch definierten WASSER-ENERGIEDOSIS D_w und der RELATIVEN BIOLOGISCHEN WIRKSAMKEIT RBW

$$D_{\text{RBW}} = D_w \cdot RBW$$

3.21

relative biologische Wirksamkeit

RBW

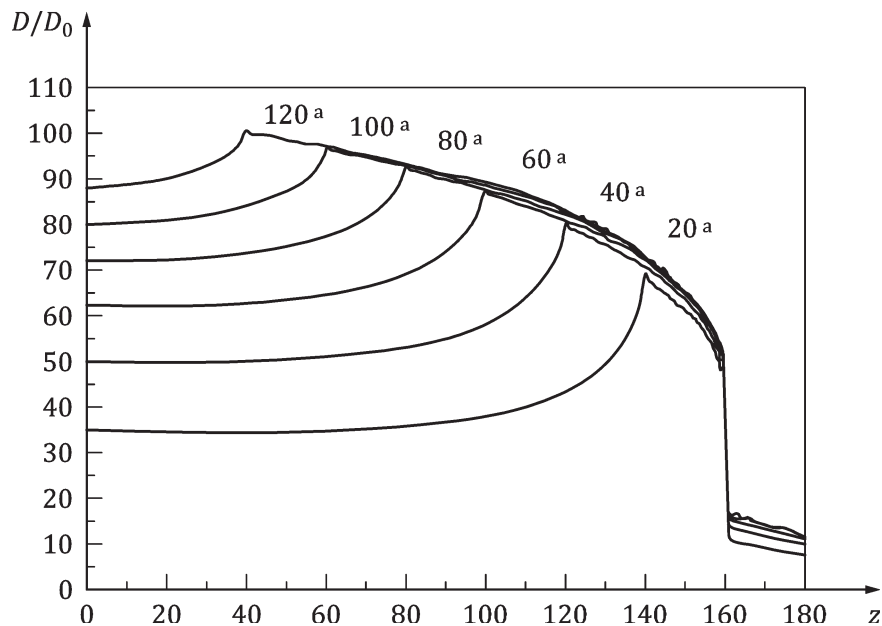
Quotient aus der WASSER-ENERGIEDOSIS einer zum Vergleich herangezogenen Strahlung D_{ref} , die zum Erreichen der gleichen Strahlenwirkung (Isoeffekt) benötigt wird, und der WASSER-ENERGIEDOSIS einer Strahlung D_Q mit der Qualität Q

$$RBW_Q = \frac{D_{\text{ref}}}{D_Q}$$

Anmerkung 1 zum Begriff: Die WASSER-ENERGIEDOSIS D_{ref} einer zum Vergleich herangezogenen Strahlung, die zum Erreichen der gleichen Strahlenwirkung (Isoeffekt) benötigt wird, ist meist ^{60}Co Gammastrahlung.

Anmerkung 2 zum Begriff: Die RBW für eine bestimmte Strahlungsart ist nicht konstant, sondern ist von einer Reihe von Einflussparametern abhängig. Sie hängt insbesondere von dem LINEAREN ENERGIEÜBERTRAGUNGSVERMÖGEN der Strahlung, aber auch von der Dosis ab.

Anmerkung 3 zum Begriff: Bei IONENSTRAHLUNG ist die Abhängigkeit der RBW von der Tiefe signifikant. Der Unterschied zwischen der Tiefenverteilung der WASSER-ENERGIEDOSIS und der Tiefenverteilung der RBW-GEWICHTETEN DOSIS ist im Bild 4 und im Bild 5 gut zu sehen. Wegen der Tiefenabhängigkeit der RBW benötigt man eine inhomogene Verteilung der WASSER-ENERGIEDOSIS über die Tiefe des Zielvolumens (Bild 4), um eine homogen verteilte RBW-GEWICHTETE DOSIS (Bild 5) zu erreichen.



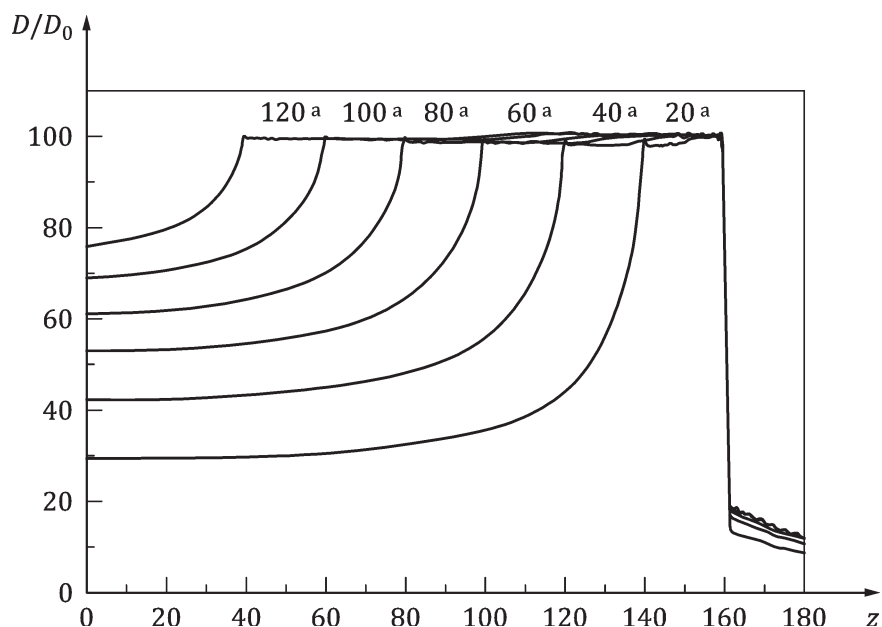
Legende

D/D_0 Quotient aus Energiedosis in Wasser und deren Maximaldosis in Prozent

z Tiefe in Wasser in cm

a Parameter für die Variationsbreite der Energiemodulation mit Werten von 20 MeV, 40 MeV, 60 MeV, 80 MeV, 100 MeV oder 120 MeV. Jeder der sechs dargestellten ausgedehnten Bragg-Peaks erstreckt sich bis zur praktischen Reichweite von 160 cm [16].

Bild 4 — Tiefenverteilungen der Wasser-Energiedosis in Wasser einer Kohlenstoffstrahlung mit einer maximalen Energie pro Nukleon von 290 MeV bei unterschiedlicher Energiemodulation



Legende

D/D_0 Quotient aus Energiedosis in Wasser und deren Maximaldosis in Prozent

z Tiefe in Wasser in cm

a Energie je Nukleon in MeV

Bild 5 — Mit Hilfe der biologischen Modellierung errechnete Tiefenverteilungen der RBW-gewichteten Dosis in Wasser bei gleicher Energiemodulation wie in Bild 3 [17]

3.22**Strahlungsqualität**

Parameter zur Klassifizierung der RELATIVEN SPEKTRALEN TEILCHENFLUSSDICHTEN einer Strahlenart für einen betrachteten Ort

[QUELLE: DIN 6814-2:2000-07, 5, modifiziert — Anmerkung wurde nicht übernommen]

3.22.1**Strahlungsqualität der einfallenden Strahlung**

in der Eintrittsebene eines bestrahlten Mediums die praktische Reichweite oder die Energie pro Nukleon der einfallenden Protonen- oder IONENSTRAHLUNG

3.22.2**Strahlungsqualität an einem Messort**

Q

an einem betrachteten Messort im bestrahlten Medium die Restreichweite der Protonen- oder IONENSTRAHLUNG

Anmerkung 1 zum Begriff: In dieser Norm wird, abweichend von DIN 6800-2, das Symbol Q nicht zur Bezeichnung des Strahlungsqualitätsindex von Photonenstrahlung, sondern zur Bezeichnung der STRAHLUNGSQUALITÄT AN EINEM MESSORT von Protonen und IONENSTRAHLUNG verwendet.

4 Messprinzip und Messverfahren

Die Methode der Ionisationsdosimetrie für Protonen- und Ionenstrahlung wird weitgehend analog zu den in DIN 6800-2 beschriebenen Methoden und Bedingungen eingesetzt. Danach beruht das Messverfahren zur Ermittlung der WASSER-ENERGIEDOSIS am MESSORT in Wasser auf der Messung der WASSER-ENERGIEDOSIS mit IONISATIONSKAMMERN, die mit ^{60}Co -Gammastrahlung im Wasser-PHANTOM zur ANZEIGE der WASSER-ENERGIEDOSIS in der Einheit Gray (Gy) kalibriert sind. Messungen der WASSER-ENERGIEDOSIS bei Protonen- und Ionenstrahlung werden durch die Anwendung von KORREKTIONSFAKTOREN ermöglicht. Diese KORREKTIONSFAKTOREN enthalten neben den Störungsfaktoren die Wasser-zu-Luft Verhältnisse des MASSEN-BREMSVERMÖGENS für ^{60}Co -Gammastrahlung und für Protonen- und IONENSTRAHLUNG. Es wird hierbei die Annahme zugrunde gelegt, dass die IONISATIONSKAMMER als eine Sonde angesehen werden kann, die für ^{60}Co -Gammastrahlung und insbesondere auch für Protonen- und Ionenstrahlung die Bragg-Gray-Bedingungen näherungsweise erfüllt. Abweichungen von diesen Bedingungen werden durch die STÖRUNGSFAKTOREN berücksichtigt.

5 Ionisationskammern für die Dosismessung und für die Ermittlung von Dosisverteilungen**5.1 Allgemeines zur Auswahl der Bauart von Ionisationskammern**

Zur Messung dürfen luftoffene KOMPAKTKAMMERN und luftoffene Flachkammern eingesetzt werden. Die Wahl einer bestimmten Bauart richtet sich nach:

- a) der Messaufgabe;
- b) dem Dosisgradienten am Messort;
- c) den geometrischen Bestrahlungsbedingungen (unter anderem der FELDGRÖÖE).

Typische Messaufgaben sind die Messung der Wasser-Energiedosis in der REFERENZTIEFE unter REFERENZBEDINGUNGEN, Messungen unter NICHT-REFERENZBEDINGUNGEN, insbesondere die Messung von relativen Dosisverteilungen.

5.2 Einsatz von Kompaktkammern

Kompaktkammern nach DIN EN 60731 werden nach dieser Norm in folgenden Fällen eingesetzt:

- a) bei der Bestimmung der Wasser-Energiedosis unter Referenzbedingungen an dem jeweiligen MESSORT (Tiefe des MESSORTES = 0,5 cm in Wasser bei monoenergetischer Protonen- und IONENSTRAHLUNG mit einer PRAKTISCHEN REICHWEITE von mindestens 1,5 cm; Tiefe des MESSORTES = Mitte des ausgedehnten Bragg-Peaks bei energiemodulierter Protonen- und Ionenstrahlung und einer Tiefe des AUSGEDEHNTEN BRAGG-PEAKS größer als 2 cm);
- b) bei der Bestimmung der WASSER-ENERGIEDOSIS unter NICHT-REFERENZBEDINGUNGEN unter der Voraussetzung, dass der Dosisgradient am MESSORT ausreichend klein ist. Als ausreichend klein wird ein Wert von unter 10 % pro mm angesehen.

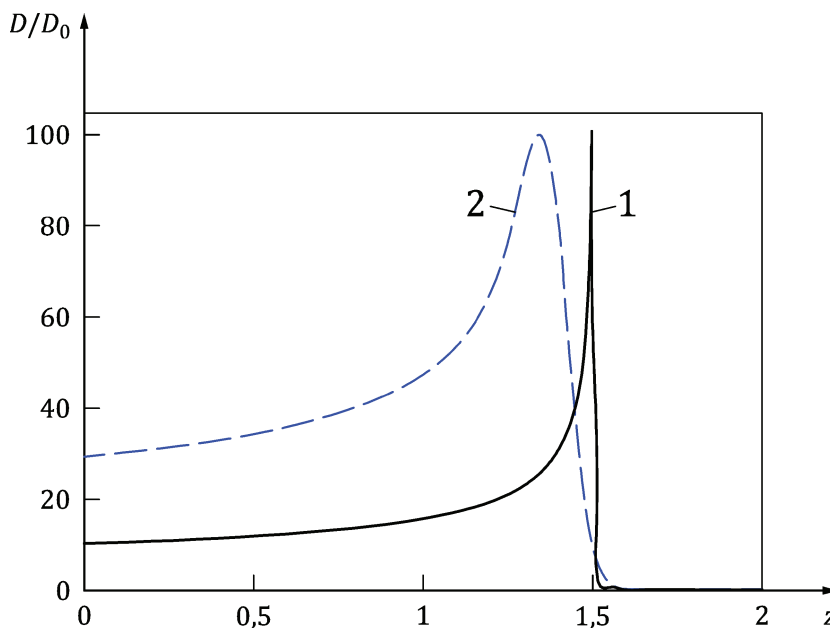
Geeignete, kleine Kompaktkammern können jedoch auch bei monoenergetischer Protonen- und Ionenstrahlung mit einer praktischen Reichweite unter 1,5 cm und bei energiemodulierter Protonen- und Ionenstrahlung mit einer Tiefe des SOBP unter 2 cm anstatt von Flachkammern eingesetzt werden.

Für die Messaufgabe bei der Bestimmung von Dosisquerverteilungen von Protonen- und Ionenstrahlung werden Mini-Kompaktkammern verwendet. Andere Detektoren wie z. B. Dioden, Diamantdetektoren oder Filme dürfen verwendet werden, sofern eine für den Messzweck ausreichende Übereinstimmung mit Ionisationskammermessungen gesichert ist.

ANMERKUNG 1 Der Verlauf der Tiefendosiskurve von monoenergetischer Protonen- und Ionenstrahlung mit einer PRAKTISCHEN REICHWEITE von mindesten 1,5 cm in Wasser wird als noch ausreichend homogen angesehen, um eine Kompaktkammer zuverlässig einsetzen zu können (siehe Bild 6).

Bei Messungen unter NICHT-Referenzbedingungen kann es vorkommen, dass der Dosisgradient am vorgesehenen MESSORT größer als 10 % pro mm ist. Wenn aus praktischen Gründen dennoch eine Kompaktkammer eingesetzt wird, muss der Einfluss des Dosisgradienten bei der Abschätzung der Unsicherheit des Messergebnisses in jedem Fall berücksichtigt werden.

ANMERKUNG 2 Ein typisches Beispiel für den Einsatz von Kompaktkammern unter NICHT-Referenzbedingungen ist die Messaufgabe der Dosisverifikation von berechneten Dosisverteilungen.



Legende

D/D_0	PDD in %
z	Tiefe in Wasser in cm
1	75 MeV/n Kohlenstoff-Ionen
2	Protonen (Bortfeld, [8])

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)

5.3 Einsatz von Flachkammern

Flachkammern werden nach dieser Norm eingesetzt bei

- a) der Bestimmung der WASSER-ENERGIEDOSIS unter Referenzbedingungen an dem jeweiligen Messort:
 - 1) von monoenergetischer Protonen- und Ionenstrahlung mit einer PRAKTISCHEN REICHWEITE von kleiner als 1,5 cm,
 - 2) von energiemodulierter Protonen- und Ionenstrahlungen mit einer Tiefe des AUSGEDEHNTEN BRAGG-PEAKS kleiner als 2 cm
- b) für die Messaufgabe zur Bestimmung von Tiefendosisverteilungen von Protonen- und Ionenstrahlung

5.4 Großflächige Kammern

Für die Messaufgabe der Tiefenverteilung des Dosisflächenprodukts von Ionenstrahlung mit kleiner FELDGRÖÖE können großflächige Flachkammern verwendet werden. Derartige Flachkammern werden auch als Bragg-Peak-Kammern bezeichnet.

Mit Hilfe solcher Kammern lässt sich das Flächenintegral der Dosis über eine Querschnittsfläche des Strahls in Abhängigkeit von der Tiefe messen. Hierdurch erhält man eine von der Vielfachstreuung der Protonen und IONENSTRAHLUNG unabhängige Darstellung des Bragg-Peaks. Insbesondere kann man damit die in Bild 7 dargestellte praktische Reichweite bestimmen.

5.5 Übersicht zur Auswahl der Bauart von Ionisationskammern

Eine Übersicht zur Auswahl der Bauart von IONISATIONSKAMMERN ist in Tabelle 2 enthalten.

Tabelle 2 — Zusammenstellung der Auswahl der Bauart von Ionisationskammern

Messaufgabe	Auswahl der Bauart von IONISATIONSKAMMERN	
Dosisbestimmung unter REFERENZBEDINGUNGEN	PRAKTISCHE REICHWEITE $\geq 1,5$ cm oder SOPB $\geq 2,0$ cm: KOMPAKTKAMMERN	PRAKTISCHE REICHWEITE $< 1,5$ cm oder SOPB $< 2,0$ cm: geeignete, kleine FLACHKAMMERN und geeignete, kleine KOMPAKTKAMMERN
Dosisbestimmung unter NICHT-REFERENZBEDINGUNGEN	Dosisgradient ≤ 10 % pro mm: KOMPAKTKAMMERN	Dosisgradient > 10 % pro mm: KOMPAKTKAMMER mit einem Volumen von nicht größer als $0,1 \text{ cm}^3$
relative Dosisverteilungen	Tiefenverteilung: FLACHKAMMERN	Profilmessung: Kammern (oder andere Detektoren) mit kleiner seitlicher Abmessung

5.6 Positionierung von Ionisationskammern

Zur Messung der WASSER-ENERGIEDOSIS in einem PHANTOM wird der EFFEKTIVE MESSPUNKT der IONISATIONSKAMMER in die MESSTIEFE z_M gebracht. Dies wird erreicht, indem man den BEZUGSPUNKT der Kammer in die Tiefe z_B nach Gleichung (1) bringt.

$$z_B = z_M + \Delta z \quad (1)$$

Dabei ist

z_B die Tiefe des BEZUGSPUNKTES der Kammer;

Δz die Bezugspunktverschiebung;

z_M die Messtiefe.

Für KOMPAKTKAMMERN gilt nach dieser Norm $\Delta z = 0,75 r$, wobei r der Radius des Messvolumens der KOMPAKTKAMMER ist.

ANMERKUNG 1 Der Wert von $0,75 r$ stellt einen Kompromiss auf der Grundlage verfügbarer Informationsquellen dar. Einzelheiten hierzu sind im Anhang D erläutert. Dieser Wert ist auch identisch mit dem in TRS 398 [16] für Ionenstrahlung angegebenen Wert.

Für Flachkammern gilt nach dieser Norm $\Delta z = 0$.

ANMERKUNG 2 Bei Photonen- und Elektronenstrahlung kann der EFFEKTIVE MESSPUNKT von Flachkammern von der Lage des Bezugspunktes abweichen. Für Protonen- und Ionenstrahlung gibt es darüber noch keine Informationen.

Bei FLACHKAMMERN muss die Eintrittsebene senkrecht zur Vorzugsrichtung der Teilchen angeordnet werden.