

Ich versichere, dass ich diese Masterarbeit selbstständig und nur unter Verwendung der angegebenen Quellen und Hilfsmittel angefertigt und die den benutzten Quellen wörtlich oder inhaltlich entnommenen Stellen als solche kenntlich gemacht habe.

Ort, Datum

Unterschrift

Danksagung

An dieser Stelle möchte ich mich zu allererst bei meinem Betreuer Johannes Berndt für die tatkräftige Unterstützung sowohl im Schreibprozess, als auch im Arbeitsalltag bedanken.

Weiterer Dank gebührt meinem Kollegen Bassim Aklan für die Hilfe bei der Programmierung der Graphen-Plots.

Auch meinem Chef, Dr. Markus Adam, möchte ich für die Möglichkeit des Masterstudiums danken.

Allen anderen Kollegen auch vielen Dank für die notwendige Motivation zwischendurch.

Besonders bedanken möchte ich mich bei der Firma PTW, insbesondere bei Herrn Kranzer für die Bereitstellung des Themas, der zur Verfügung gestellten Dosimeter und der Unterstützung bei fachlichen Fragen.

Ich bedanke mich zudem ganz herzlich bei Dr. rer. nat. Hui Khee Looe für die große Unterstützung bei der Interpretation des DIN-Entwurfes.

Zu guter Letzt gilt meiner Familie ein ganz besonderer Dank. Vielen Dank für die jahrelange Unterstützung in meiner bisherigen Laufbahn, der Motivation und Liebe, die mich in all meinen Vorhaben gestärkt haben. Auch meiner Freundin gebührt ein großer Dank für die Geduld und das Verständnis während der Studienzeit.

Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis	i
1 Einleitung	7
1.1 Überblick und Stand der Technik	7
1.2 Ziel der Arbeit	9
2 Material und Methoden	10
2.1 Linearbeschleuniger Clinac DHX Firma Varian	10
2.2 MP3-M Wasserphantom, Steuergerät, Software	12
2.3 Elektrometer TANDEM	13
2.4 Dosimeter zur Absolutdosimetrie	14
2.5 Messkammern	16
2.5.1 Roos-Kammer (PTW)	16
2.5.2 Markus-Kammer (PTW)	17
2.5.3 Advanced Markus-Kammer (PTW)	18
2.5.4 Farmer-Kammer (PTW)	19
2.5.5 Flachkammer PPC40 (IBA)	20
2.6 Messaufbau Tiefendosiskurven	21
2.7 Tiefendosismessungen	23
2.8 Messaufbau Absolutdosimetrie	24
2.9 Absolutdosimetrie-Messungen	24
2.10 Korrektionsfaktoren	25
2.10.1 k_p - Korrektion der Luftdichte	25
2.10.2 k_h - Korrektion der Luftfeuchte	26
2.10.3 k_s - Korrektion unvollständigen Sättigung	26
2.10.4 k_p - Korrektion der Polarität	26
2.10.5 k_r - Korrektion der Positionierung	27
2.10.6 k_E - Wasser-Energiedosis bei Elektronenstrahlung	27
2.10.7 k_{NR} – Korrektion für Nicht-Referenzbedingungen	29
2.10.8 Werte Korrektionsfaktoren für verwendete Kammern	30

3	Ergebnisse	33
3.1	Auswertung der Tiefendosiskurven	33
3.1.1	optische Auswertung	33
3.1.1.1	Roos-Kammer	33
3.1.1.2	PPC40-Kammer	34
3.1.1.3	Markus-Kammer	35
3.1.1.4	Advanced Markus-Kammer	36
3.1.1.5	Farmer-Kammer	36
3.1.2	Auswertung der Halbwerttiefe R_{50}	38
3.1.2.1	Roos-Kammer	39
3.1.2.2	PPC40-Kammer	39
3.1.2.3	Markus-Kammer	40
3.1.2.4	Advanced-Markus-Kammer	40
3.1.2.5	Farmer-Kammer	41
3.1.2.6	Stabilität Farmer-Kammer	42
3.2	Auswertung der Absolutdosimetrie	43
3.2.1	Roos-Kammer	43
3.2.2	PPC40-Kammer	43
3.2.3	Markus-Kammer	44
3.2.4	Advanced-Markus-Kammer	44
3.2.5	Farmer-Kammer	45
4	Diskussion	46
4.1	Tiefendosiskurven	46
4.2	Absolutdosimetrie	47
4.2.1	Flachkammern	47
4.2.2	Farmer-Kammern	50
4.3	Berechnung $k_{E,R}$ -Faktor	52
5	Zusammenfassung	56
	Abbildungsverzeichnis	59
	Tabellenverzeichnis	60
	Literaturverzeichnis	61

Anhang	65
A.1 Technische Daten Messkammern	65
A.1.1 Roos-Kammer	65
A.1.2 PPC40-Kammer	66
A.1.3 Markus-Kammer	69
A.1.4 Advanced-Markus-Kammer	70
A.1.5 Farmer-Kammer	71
A.1.6 MP3-M System	72
A.1.7 UNIDOS (PTW)	73
A.1.8 Dose 2 (IBA)	76
A.2 Korrekturfaktoren der verwendeten Kammern	79
A2.1 PPC40-Kammer nach DIN 2008	79
A2.2 PPC40-Kammer nach DIN 2016	80
A2.3 Markus Kammer nach DIN 2008	81
A2.4 Markus Kammer nach DIN 2016	82
A2.5 Adv. Markus Kammer nach DIN 2008	83
A2.6 Adv. Markus Kammer nach DIN 2016	84
A2.7 Farmer-Kammer 00 nach DIN 2008	85
A2.8 Farmer-Kammer 00 nach DIN 2016	86
A2.9 Farmer-Kammer 01 nach DIN 2008	87
A2.10 Farmer-Kammer 01 nach DIN 2016	88
A2.11 Farmer-Kammer 02 nach DIN 2008	89
A2.12 Farmer-Kammer 02 nach DIN 2016	90

1 Einleitung

1.1 Überblick und Stand der Technik

In der modernen Strahlentherapie ist die Qualitätssicherung das wichtigste und herausforderndste Aufgabengebiet des Medizinphysikexperten und sichert die akkurate Bestrahlung der Patienten. Mit verschiedenen DIN-Normen werden den Medizinphysikexperten ausführliche Anleitungen über den Umfang, die Durchführung und die Bewertung der notwendigen Messungen in die Hand gegeben. Die Umsetzung wird in regelmäßigen Abständen sowohl von Sachverständigen (jährlich), als auch von der Ärztlichen Stelle (mindestens alle 2 Jahre), sowie bei der Messtechnischen Kontrolle (MTK) überprüft und bewertet. Die Normen berücksichtigen dabei jegliche Komponenten eines Linearbeschleunigers. Für Linearbeschleuniger, wie sie in der Strahlentherapie zum Einsatz kommen, ist die Normenreihe 6847 ‚Medizinische Elektronenbeschleuniger-Anlagen‘ umzusetzen. Diese besteht aus drei Teilen:

- Teil 2: Regeln für die Auslegung des baulichen Strahlenschutzes
- Teil 5: Konstanzprüfungen von Kennmerkmalen
- Teil 6: Elektronische Bildempfänger (EPID) – Konstanzprüfung

Besonderes Augenmerk ist auf dosimetrische Überprüfungen zu legen. Deshalb wird täglich vor Bestrahlungsbeginn, neben anderen Kontrollen, eine dosimetrische Überprüfung aller Energien vorgenommen. Weiterhin schreibt die DIN 6847-5 ‚Medizinische Elektronenbeschleuniger-Anlagen – Teil 5: Konstanz von Kennmerkmalen‘ nach Abschnitt 7.2, 8.1.1, 8.2.1 der DIN EN 60976:2011-02 die vierzehntägliche und halbjährliche Überprüfung der Konstanz der Kalibrierfaktoren bzw. die Messung der Tiefendosisverteilung vor. Diese werden ebenfalls für alle Energien des Linearbeschleunigers durchgeführt. Dabei sollen laut aktueller Dosimetrie-Protokolle [ABCH⁺99, PBHH⁺00, DIN08a] Flachkammern mit breitem Guardring für die Elektronendosimetrie, vor allem für Energien $< 10\text{MeV}$, benutzt werden. Diese Empfehlung geht im

Wesentlichen auf den ICRU Report No. 35 [SABD⁺84] aus dem Jahre 1985 zurück. Die Photonenenergien werden entsprechend mit Kompaktkammern, beispielsweise Farmerkammern, überprüft.

Die Task Group TG51 der AAPM (The American Association of Physicists in Medicine) arbeitet nun darauf hin, Kompaktkammern für die Absolutdosimetrie bei Elektronen auch für Energien < 10 MeV einzusetzen. Hintergrund sind geringere Unsicherheiten der Korrekturfaktoren und eine geringere Variabilität zwischen Kammern gleicher Bauart. Zusätzlich würde die Absolutdosimetrie mit nur einer Kammer für alle Energien den Arbeitsablauf für den Medizinphysikexperten erleichtern. Laut einer weltweiten Umfrage zur Umsetzung der Referenzdosimetrie [MCDK⁺17] werden die Bestrebungen der Working Group TG51 bereits in einigen Institutionen umgesetzt. In der Arbeit von Muir et al [MM17] wurden die Messungen mit einer Farmer-Kammer NE2571 durchgeführt. Entsprechend soll mit dem gleichen Ziel die Verwendung der Farmer-Kammer T30013 von PTW Freiburg überprüft werden.

Voraussetzung für ideale Messungen ist ein präziser Messaufbau. Vor allem die Positionierung der Messkammern im Phantom ist für die Qualität der Messungen ausschlaggebend. Hierfür bietet die DIN 6800-2 [DIN08a] (aktuell gültige Ausgabe aus dem Jahr 2008) folgende Vorschrift:

„Kompaktkammern werden im Phantom so positioniert, dass der Bezugspunkt um $r/2$, den halben Innenradius der äußeren Messelektrode, tiefer liegt als der Messort. (...)

Flachkammern werden im Phantom so positioniert, dass die äquivalente Wassertiefe des Bezugspunktes mit der Messtiefe in Wasser übereinstimmt. Die äquivalente Wassertiefe des Bezugspunktes ist die Summe aus der Wassertiefe der Frontfläche der Flachkammer und der Wasseräquivalenten Schichtdicke des Strahlungseintrittsfensters.

$$d_{\text{äq}} = \sum_i \frac{\rho_{e,i}}{\rho_{e,w}} d_i \quad (1.1)$$

Der Index i bezeichnet eine Materialschicht mit der Dicke d_i und der volumenbezogenen Elektronendichte $\rho_{e,i}$ und $\rho_{e,w}$ ist die Elektronendichte von Wasser (...).

Eine eventuell vorhandene Schutzkappe der Flachkammer ist in dieser Summe zu berücksichtigen. Die Eintrittsebene der Flachkammer muss senkrecht zur Vorzugsrichtung der Strahlung angeordnet werden. (...) Demnach ist der Bezugspunkt der Flachkammer in die Tiefe

$$z_B = z_m + d_f - d_{\text{äq}} \quad (1.2)$$

zu bringen.“

In der kommenden DIN6800-2 (Entwurf 10.2016) hat sich die Positionierungsvorschrift gegenüber der aktuell gültigen DIN-Ausgabe für Flachkammern und Kompaktkammern geändert. Dies geht auf eine Reihe von experimentellen Arbeiten [z.B. LHK12a, LHK12b, LHP11] sowie Monte-Carlo-Simulationen [z.B. THM10, TK10, WR09] zurück.

Laut diesem Entwurf wird bei der Messung der Wasser-Energiedosis nun nicht mehr der Bezugspunkt, sondern der effektive Messpunkt in die Messtiefe gebracht. Der effektive Messpunkt ergibt sich aus der Messtiefe z_M addiert mit der Bezugspunktverschiebung Δz :

$$z_B = z_M + \Delta z \quad (1.3)$$

Die Werte für Δz wurden dabei als Mittelwert aus den ermittelten Bezugspunktverschiebungen für die einzelnen Energien gebildet [VCZ13].

Durch die Verschiebung ergeben sich Unterschiede in der Messtiefe von bis zu 0,56 mm. Dies wirkt sich sowohl auf die Tiefendosiskurven (PDDs) als auch auf die Absolutdosimetrie aus. Für Flachkammern ergibt sich eine Verschiebung Richtung Wasseroberfläche ($\Delta z \leq 0$), für Kompaktkammern eine Verschiebung in die Tiefe ($\Delta z > 0$).

Zusätzlich zu den Positionierungsvorschriften sind in der DIN6800-2 Formeln für alle anzuwendenden Korrekturfaktoren gegeben. Diese sollen die Abweichungen zu den Bedingungen der Kalibriermessung unter ^{60}Co -Strahlung ausgleichen. Diese Formeln haben sich in dem Entwurf von 2016 zum Teil ebenfalls geändert. Für die Berechnung sind bereits Tabellen mit für die Berechnungen notwendigen kammer-spezifischen Werten gegeben. Zusätzlich werden im Anhang einige Messaufbauten zur Überprüfung einzelner Faktoren aufgeführt.

1.2 Ziel der Arbeit

In der vorliegenden Arbeit soll nun zu Beginn der Einfluss der veränderten Positionierungsvorschrift aus dem Entwurf der DIN 6800-2 mit verschiedenen Kammern der Firma PTW Freiburg und einer Flachkammer der Firma IBA betrachtet werden. Idealerweise ergeben die neue Positionierung und die zum Teil veränderten Berechnungen der Korrekturfaktoren nur wenig voneinander abweichende Messergebnisse in der Absolutdosimetrie für jeden Kammertyp. Weiterhin wird das Verhalten der Farmer-Kammer in der Dosimetrie mit Elektronen betrachtet und der Korrekturfaktor k_E , für welchen es im DIN-Entwurf von 2016 noch keine Werte gibt, ermittelt.

2 Material und Methoden

2.1 Linearbeschleuniger Clinac DHX Firma Varian

Das Bestrahlungssystem besteht grundlegend aus einem Linearbeschleuniger, einem Kollimator und einem Bestrahlungstisch (Couch). Diese Hauptkomponenten sind alle auf das sogenannte Isozentrum ausgerichtet, welches durch ein raumfestes Lasersystem sichtbar gemacht wird. Sowohl die Gantry, als auch der Kollimator und die Couch rotieren um dieses Isozentrum. Somit treffen sich alle Zentralstrahlen der Bestrahlungsfelder in diesem Punkt. Jeder Patient wird durch das Lasersystem auf das Isozentrum ausgerichtet, weshalb es zur Positionierung sowohl von Patienten als auch von Phantomen zur Qualitätssicherung unerlässlich ist. Zusätzlich zu dem Lasersystem kann das Isozentrum, mit Hilfe des Lichtfelds und dem im Lichtvisier eingebauten Fadenkreuz, sichtbar gemacht werden. Da das Isozentrum eine sehr wichtige Komponente ist, ist es regelmäßig mit Lichtfeld-Strahlenfeld-Messungen zu überprüfen.



Abbildung 1: Linearbeschleuniger Clinac DHX der Firma Varian [VAR]

Der Linearbeschleuniger Clinac DHX High Performance der Firma Varian (siehe Abbildung. 1) wurde 2009 in der Praxis für Strahlentherapie in Freising aufgestellt. Ausgestattet ist das etwa 12 Tonnen schwere Gerät mit einem Electronic Portal Imaging Device (EPID), einem On-Board-Imager (OBI) und dem Multilamellenkollimator Millenium HD120. Sowohl das EPID als auch das OBI dient in erster Linie der Verifikation der Patientenlagerung mittels MV- und KV-Bildgebung. Mit Hilfe des OBI können außerdem sogenannte Cone-Beam-CT gefahren werden.

Der Multilamellenkollimator (MLC) ermöglicht eine genau an den Tumor angepasste Feldformung, womit eine bessere Schonung des umliegenden gesunden Gewebes (Normalgewebe, NT) erreicht wird. Er besteht aus 120 wolframlegierten Lamellen, 60 Lamellen pro Seite, wobei die äußeren 56 Lamellen einen Durchmesser von 1,0 cm haben, die inneren 64 Lamellen 0,5 cm dick sind. Die maximal mögliche Feldöffnung beträgt 40 x 40 cm.

Mit dem Linearbeschleuniger ist die Bestrahlung mit Photonen und mit Elektronen realisierbar. Dabei stehen die Photonenenergien 6 MV und 15 MV zur Verfügung. Elektronenbestrahlungen sind mit den Energien 4 MeV, 6 MeV, 9 MeV, 12 MeV und 15 MeV möglich. Für die Elektronenbestrahlung ist zur Kollimation des Elektronenstrahls die Anbringung eines Tubuses an der Gantry notwendig. Diese gibt es in verschiedenen Größen, beispielsweise 10 x 10 cm, 20 x 20 cm und 25 x 25 cm. In dieser Arbeit wird der 20 x 20 cm Tubus genutzt (Abbildung 2).

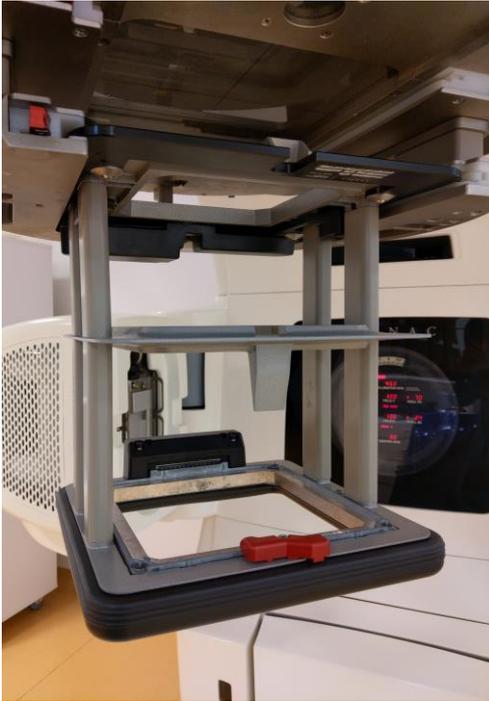


Abbildung 2: 20 x 20 cm Elektronentubus

Die Dosisrate ist dabei für alle Energien von 100 Monitoreinheiten pro Minute bis 600 Monitoreinheiten pro Minute wählbar. Im Dosismaximum entsprechen 100 Monitoreinheiten etwa 1 Gy. Es lässt sich sowohl die Step and Shoot Technik, als auch die Sliding Window Technik der intensitätsmodulierten Strahlentherapie umsetzen. Eine Bestrahlung in unterschiedlichen Atemphasen, beispielsweise zur Schonung von Herz und Lunge bei linksseitiger Brustbestrahlung, ist mit Hilfe des Varian Real Time Positioning Management Systems (RPS) möglich. Die modulierte Rotationsbestrahlung (Volumetric modulated arc therapy, VMAT) lässt sich erst nach Aufrüstung in das Behandlungsangebot aufnehmen.

2.2 MP3-M Wasserphantom, Steuergerät, Software

Das MP3-M Wasserphantom der Firma PTW Freiburg besteht aus einem 2 x 94 Liter fassenden Tank-/Hubwagen T41024 und einem sich darauf befindlichen Acrylglasbehälter T41022.1.001 mit eingebauter Bewegungsmechanik. Mit Hilfe dreier Stellschrauben und dreier Stellfüße lässt sich das Wasserphantom in Waage bringen.

Die Bewegungsmechanik besteht aus drei Achsen, A, B und C, welche es ermöglichen, die Messkammer in lateraler, vertikaler und longitudinaler Richtung zu justieren. Für die Verschiebung ist das Handsteuergerät Therapy Beam Analyzer (TBA) Control Pendant zu nutzen. Das TRUFIX Detector Positioning System oder die Messkammerhalterung wird auf einer dafür vorgesehenen Halterung des C-

Schlittens montiert. Das TRUFIX-System dient dabei der genauen Ausrichtung der Bewegungsmechanik auf den Bezugspunkt nach DIN6800-2 (2008). Die Positionierung ist auf einen zehntel Millimeter genau einstellbar.



Abbildung 3: MP3-M Wasserphantomsystem PTW Freiburg [PTW Da]

Da die TBA Control Unit die Steuerung der Bewegungsmechanik mit dem PC verbindet, ist es möglich, die Steuerung von außen mit Hilfe der Software Mephysto (Version 2.1) zu übernehmen. Zudem werden in der Software alle für die Messungen wichtigen Einstellungen wie beispielsweise Energie, Feldgröße, SSD, verwendete Messkammer und Art der Messung, sowie die Messparameter, Messstufen und Messgeschwindigkeiten und Ähnliches eingestellt. Außerdem ist über die Software die Nullmessung zu starten, mit der die Hintergrundstrahlung bestimmt wird.

Technische Daten der einzelnen Elemente sind im Anhang A1 zu finden.

2.3 Elektrometer TANDEM

Das TANDEM-Elektrometer T10011 der Firma PTW ist ein Strommessgerät, welches aufgrund absoluter Kalibrierung für Absolutmessungen sowohl von Dosis als auch von Dosisleistung benutzt werden kann. Es handelt sich um ein Zweikanal-Elektrometer, welches ebenfalls für Relativmessungen genutzt werden kann. Die Spannung sowie die Polarität ist dabei für jede Kammer einzeln anwählbar.

Es sind Spannungswerte zwischen 0 bis ± 400 V in 50 V-Schritten einstellbar.



Abbildung 4: TANDEM-Elektrometer mit TBA Control Unit

2.4 Dosimeter zur Absolutdosimetrie

Für die Messung der Absolutdosimetrie mit PTW-Kammern wird das Universal-Dosimeter UNIDOS^{webline} T10021 der Firma PTW verwendet. Es handelt sich um ein mikroprozessorgesteuertes Dosimeter der Referenzklasse und wird in der Strahlentherapie für Messungen von Dosis und Dosisleistungen eingesetzt.



Abbildung 5: UNIDOSwebline PTW Freiburg [PTWDb]

Zusätzlich zu den Messkammern von PTW wird eine Kammer von IBA verwendet. Die Absolutdosimetrie dieser Kammer wird mit dem Dose 2 DA28-000 von IBA gemessen. Dieses ist ebenfalls ein Dosimeter der Referenzklasse und für die Messung von Dosis und Dosisleistung ausgelegt. Anders als bei dem UNIDOS-Dosimeter ist es hier möglich zwei Kammern anzuschließen.



Abbildung 6: Dosimeter Dose 2 IBA [IBAc]

An beiden Dosimetern lassen sich die zu verwendenden Kammern in einer Bibliothek speichern. Dabei werden alle notwendigen Daten, wie beispielsweise Kammeranspannung und Polarität der jeweiligen Messkammer hinterlegt.

2.5 Messkammern

Für diese Arbeit werden Messkammern der Firma PTW zur Verfügung gestellt. Zusätzlich werden zwei Kammern von IBA verwendet. Dabei werden die Auswirkungen der veränderten Positionierung der Messkammern mit folgenden Kammern untersucht:

- Roos-Kammer Ionisationskammer Typ TM34001 (PTW)
- Markus-Kammer Ionisationskammer Typ TM23343 (PTW)
- Advanced Markus-Kammer Ionisationskammer Typ TM34045 (PTW)
- Farmer-Kammer Ionisationskammer Typ 30013 TM (PTW)
- Plan-Parallele Ionisationskammer Typ PPC40 DS31-000 (IBA)

Um Unterschiede zwischen baugleichen Messkammern zu eruieren wird die Farmer-Kammer von PTW in dreifacher Ausführung verwendet. Zudem wird das Verhalten der Farmer-Kammern bei Elektronenstrahlung untersucht.

2.5.1 Roos-Kammer (PTW)

Bei der Roos-Kammer Typ 34001 handelt es sich um eine Flachkammer oder Parallelplattenkammer. Sie wird für die Messung von Elektronenstrahlung verwendet und hat ein Messvolumen von etwa $0,35 \text{ cm}^3$. *„Die Ionisationskammer Typ 34001 dient zum Messen von Dosis oder Dosisleistung in der Messgröße Wasserenergiedosis im Festkörperphantom oder Wasserphantom in der Strahlentherapie. Die Ionisationskammer hat einen breiten Guardring, so dass auch bei niedriger Elektronenenergie und im Aufbaubereich der Photonenstrahlung keine Feldstörungen auftreten. (...) Die Kammer ist zur Verwendung im Wasserphantom wasserdicht.“* [PTWb].

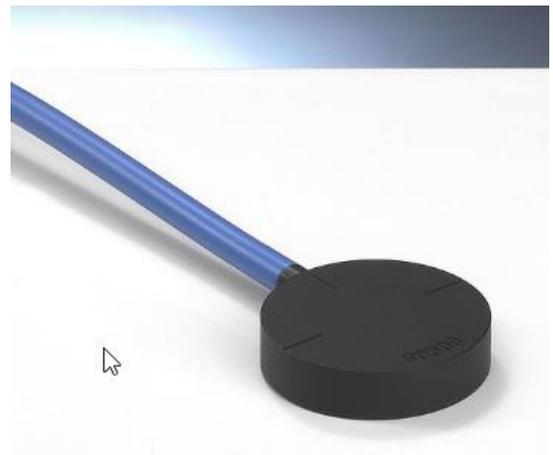
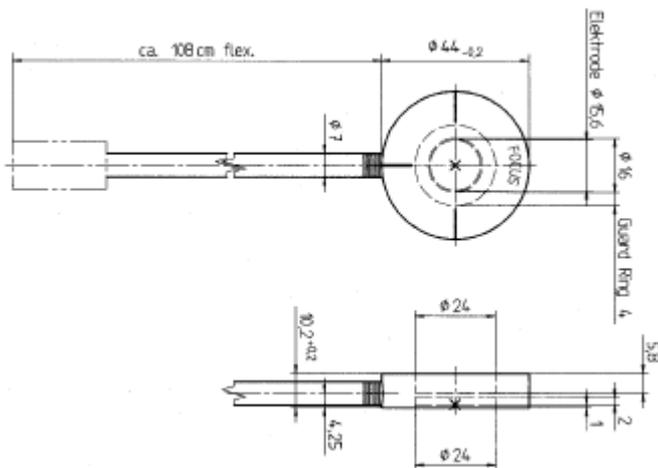


Abbildung 7: Ionisationskammer Typ 34001 (Maße in mm)
(PTWb; PTWdc]

Die technischen Daten der Roos-Kammer sind in Anhang A1 zu finden.

2.5.2 Markus-Kammer (PTW)

Auch bei der Markus Kammer des Typs 23343 handelt es sich um eine Flachkammer für die Messung von Elektronenstrahlen. Allerdings ist diese Kammer nicht wasserdicht, weshalb für Messungen in Wasser stets eine Schutzkappe aufgeschraubt werden muss. Wie auch die Roos-Kammer besitzt die Markus-Kammer einen Guard-Ring, welcher jedoch kleiner ist als bei der Roos-Kammer. Das nominelle Kammervolumen beträgt $0,055 \text{ cm}^3$. Die Markus-Kammer ist ebenfalls für die Absolutdosimetrie hochenergetischer Elektronenstrahlung, sowie die Messung von Strahlprofilen im Sinne der Wasser-Energiedosis beziehungsweise Wasser-Energiedosisleistung anzuwenden.

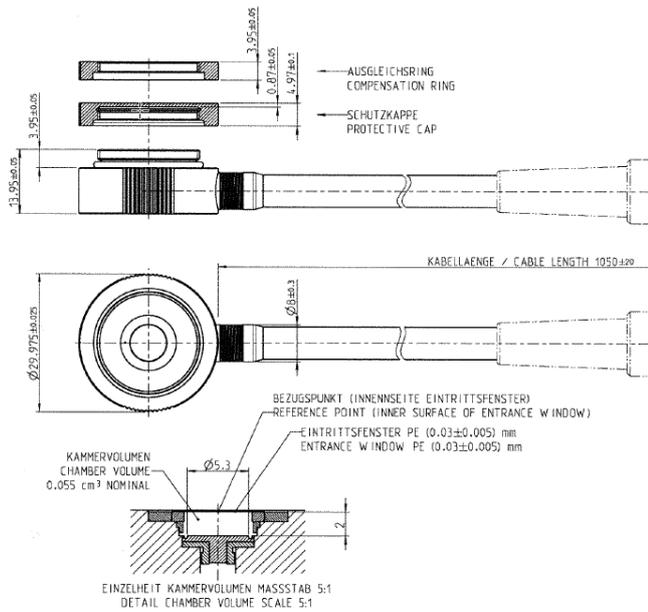


Abbildung 8: Ionisationskammer Typ 23343 (Maße in mm) [PTWc]

Die technischen Daten sind Anhang A1 zu entnehmen.

2.5.3 Advanced Markus-Kammer (PTW)

Die dritte Flachkammer dieser Arbeit ist die Advanced Markus-Kammer Typ 34045. Wie schon die Markus-Kammer handelt es sich um eine luftoffene, nicht wasserdichte Kammer, weshalb die Messungen in Wasser mit Schutzkappe erfolgen muss. PTW Freiburg beschreibt die Zweckbestimmung der Advanced Markus-Kammer [PTWd] wie folgt: „Die Advanced Markus-Kammer 0,02 cm³ ist für dosimetrische Messungen im Kontext einer Strahleinrichtung bestimmt. Das Gerät ist zur Bestimmung der Strahleigenschaften (Strahldatenerfassung) oder der Absolutdosis während der Inbetriebnahme und/oder für regelmäßige Qualitätssicherungsmaßnahmen entsprechend des QS-Plans des verantwortlichen Medizinphysikers vorgesehen. (...) Die Advanced Markus-Kammer 0,02cm³ dient (...) für die Messung von hochenergetischen Elektronenstrahlen. Sie dient als Referenzkammer zur Absolutdosimetrie, d.h. zum Messen von Dosis und Dosisleistung in der Strahlentherapie.“

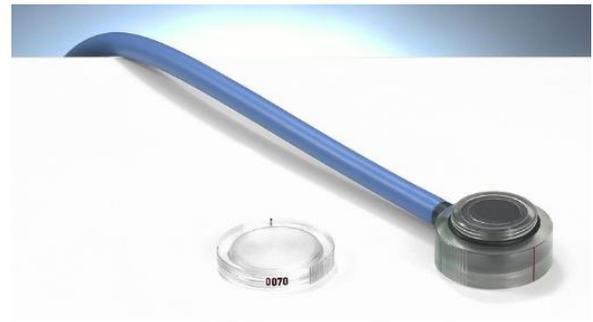
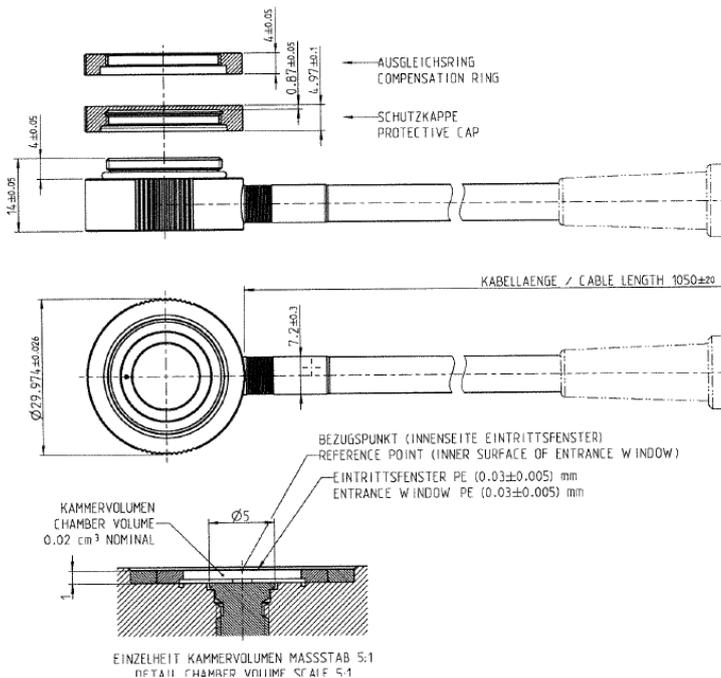


Abbildung 9: Ionisationskammer Typ 34045 (Maße in mm) [PTWd]

Die technischen Daten sind Anhang A1 zu entnehmen.

2.5.4 Farmer-Kammer (PTW)

Bei der in dieser Arbeit verwendeten Kompaktkammer handelt es sich um eine Farmer-Kammer des Typs 30013 mit einem Messvolumen von 0,6cm³. Die luftoffene, wasserdichte Fingerhut-Kammer „ist für dosimetrische Messungen im Kontext eines Bestrahlungssystems oder Röntgen-Diagnostik-Systems bestimmt. Das Gerät ist zur Bestimmung der Strahleigenschaften oder Absolutdosis der Strahleinrichtung (Strahldatenerfassung) während der Inbetriebnahme und/oder für regelmäßige Qualitätssicherungsmaßnahmen (...) vorgesehen.“ [PTWe]. Dabei ist sie sowohl für Absolut-, als auch für Relativmessungen, sowie für Kalibriermessungen in Festkörperphantomen oder in Luft verwendbar. Es handelt sich um eine weit verbreitete Kammer, welche primär für die Dosimetrie mit Photonen eingesetzt wird. In aktuellen Dosimetrie-Protokollen wird auch die Verwendung für Elektronenstrahlung beschrieben, allerdings erst bei höheren Energien ab 10 MeV [vgl. z.B. PBHH⁺00, DIN08a]. In einigen Einrichtungen werden aber bereits Kompaktkammern für die Dosimetrie auch für niedrigere Elektronenenergien verwendet. [vgl. MM17]

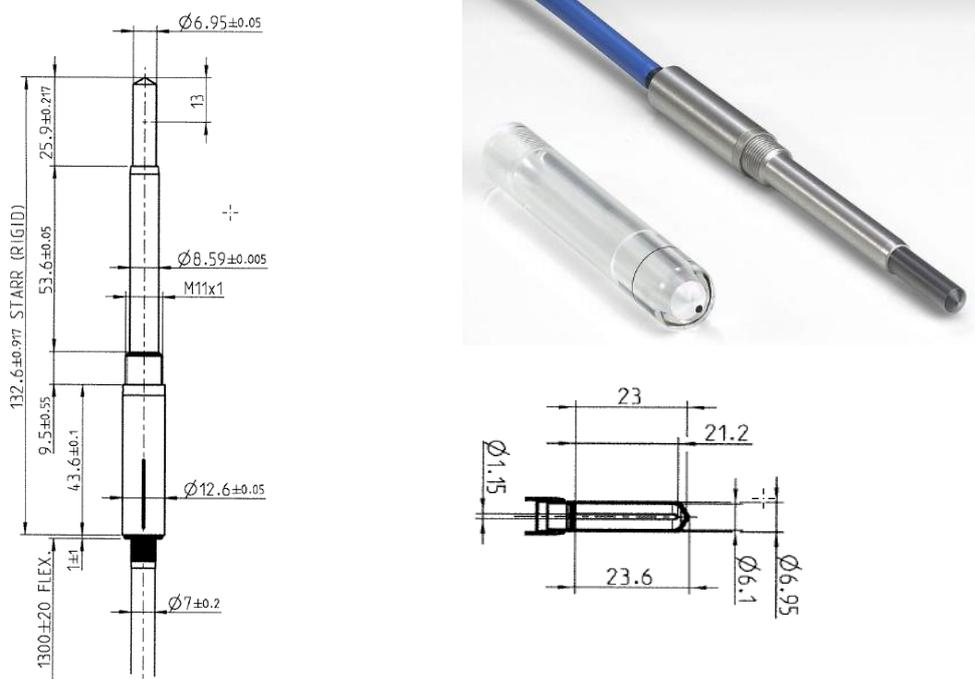


Abbildung 10: Ionisationskammer Typ 30013 (Maße in mm)

Die technischen Daten sind Anhang A1 zu entnehmen.

2.5.5 Flachkammer PPC40 (IBA)

Die Plan-Parallele Ionisationskammer von IBA ist, wie die Roos-Kammer, ohne Schutzkappe wasserdicht. Sie hat ein nominelles Messvolumen von $0,4 \text{ cm}^3$ und ist für die Absolut- und Relativedosimetrie von Elektronenstrahlung entworfen. Außerdem kann sie für die Absolut- und Relativedosimetrie von Protonen, sowie für Tiefendosismessungen von Photonen genutzt werden.



Abbildung 11: Flachkammer PPC40 IBA

2.6 Messaufbau Tiefendosiskurven

Für die Messung der Tiefendosiskurven der einzelnen Messkammern nach DIN 6800-2 wird das unter 2.2 beschriebene MP3-M Wasserphantom der Firma PTW verwendet. Das Phantom wird mit Hilfe einer Wasserwaage und den Wandlasern ausgerichtet. Nachdem das Wasser in das Phantom gefüllt worden ist, wird das Wasserphantom auf SSD 100 gebracht und dann mit Hilfe des TRUFIX pointing device with cone point der Bezugspunkt nach DIN 6800-2 aus dem Jahr 2008 eingestellt.



Abbildung 12: TRUFIX pointing device mit cone point

Dabei wird die laterale und longitudinale Markierung nach den Lasern, also nach dem bereits erwähnten Isozentrum, ausgerichtet. Diese Position wird mit dem Fadenkreuz nochmals kontrolliert. Die vertikale Einstellung wird erreicht, indem die Spiegelung der Spitze des TRUFIX-Einsatzes an der Wasseroberfläche die reale Spitze gerade berührt. Vor der Aufnahme der ersten Messkurven wird die Ausrichtung der Kammer mit dem Softwaretool ‚Check of Beam Center‘ überprüft. Dabei werden in zwei Tiefen Profile inline und crossline aufgenommen. Mit Hilfe der Halbwertbreite wird der Mittelpunkt der jeweiligen Kurve bestimmt. Die Software empfiehlt den Vershub in Richtung der ermittelten Mittelpunktachse. Sollte eine Rotation der Strahlachse detektiert werden, wird diese über die Neigung der Gantry ausgeglichen.



Abbildung 13: Messaufbau für Tiefendosiskurven

Der Bezugspunkt der einzelnen Kammern ergibt sich rechnerisch aus folgender Formel: $z_B = z_m + d_f - d_{aq}$ und wird automatisch mit den entsprechenden Kammerhalterungen erreicht.

Um die effektive Messtiefe nach DIN6800-2 (2016) zu erreichen, wird eine Bezugspunktverschiebung addiert: $z_B = z_m + \Delta z$. Für die in dieser Arbeit verwendeten Messkammern bedeutet das folgende Verschiebungen:

Tabelle 1: Bezugspunktverschiebung nach DIN6800-2 (2106)

Messkammer	Bezugspunktverschiebung Δz
Farmer-Kammer	+1,525mm ($0,5 \cdot r$ mit r: Radius des Messvolumens)
Roos-Kammer	-0,4mm
PPC40-Kammer	-0,4mm
Markus-Kammer	-0,3mm
Advanced Markus-Kammer	+0,0mm

Mit Hilfe des TBA Positioning Unit werden die Bezugspunktverschiebungen vorgenommen.

Als Referenz-Ionisationskammer wird die $0,125\text{cm}^3$ Semiflex-Kammer Typ 31010 der Firma PTW verwendet. Die Notwendigkeit der Referenz-Ionisationskammer besteht zum einen in der Beam-Triggerung. Zum Anderen werden durch diese Messkammer Schwankungen im Beam-Output ausgeglichen. Sie wird mit Hilfe des Feldlichtes so ausgerichtet, dass sie im Bestrahlungsfeld liegt, die Tiefendosismessungen aber nicht beeinflusst.

Zusätzlich für die Bestrahlung mit Elektronen notwendig ist der Anbau des Accessory-Mounts und eines Tubus. Für die in dieser Arbeit durchgeführten Messungen wird der Tubus 20×20 cm verwendet.

An dem TANDEM Elektrometer werden die in den Gebrauchsanweisungen bzw. Kalibrierscheinen festgeschriebenen Kammerspannungen sowie die Polarität eingestellt.

2.7 Tiefendosismessungen

Für die Aufnahme der Messkurven wird die Software Mephisto Version 6.1.7601 (Service Pack 1) der Firma PTW verwendet. Die Einstellungen der Messgeschwindigkeit sowie der Messstufen wird an die Messkammern und Elektronenenergien angepasst. Dabei wird für 4 MeV eine Schrittweite im steilen Bereich der Kurve von 0,3 mm (sonst 0,5 mm) und im flacheren Bereich von 0,5 mm (sonst 1,5mm) genutzt. Für die allgemeine Vorgabe der Messgeschwindigkeit wird für den steilen Bereich 1 mm/s , für die restliche Krüve mit 2 mm/s gewählt. Vor der Aufnahme der ersten Messkurven wird die Ausrichtung der Kammer mit dem Softwaretool ‚Check of Beam Center‘ überprüft und wenn nötig, wie bereits im vorangegangenen Kapitel erwähnt, korrigiert.

Nach der Nullmessung wird jede Kammer mit 1000 Monitoreinheiten vorbestrahlt. Die Wassertemperatur sowie der Luftdruck werden regelmäßig kontrolliert. Die Tiefendosiskurven werden, wie üblich, von der Tiefe hin an die Wasseroberfläche gemessen. Pro Energie und Kammer werden Messungen nach Ausrichtung der DIN6800-2 von 2008 und von 2016 sowie für beide Polaritäten durchgeführt.

2.8 Messaufbau Absolutdosimetrie

Für die Messung der Absolutdosimetrie wird ebenfalls das Wasserphantom aufgebaut. Die Positionierung bleibt zu der Messung der Tiefendosiskurven dabei unverändert. Da es sich um eine absolute Messung handelt, wird keine Referenzelektrode benötigt.

Die Messkammer wird an das UNIDOS beziehungsweise an das Dose 2 angeschlossen. Am Dosimeter wird davor die anzuschließende Kammer ausgewählt, um Spannungsfehler zu vermeiden. Um den Korrektionsfaktor für den Einfluss der Luftdichte korrekt berechnen zu können, wird die Wassertemperatur und der Luftdruck häufig kontrolliert.

2.9 Absolutdosimetrie-Messungen

Die Kammern werden in Referenztiefe positioniert. Diese ergibt sich laut beiden Ausgaben der DIN nach folgender Formel, wobei es sich bei dem Faktor R_{50} um die Halbwerttiefe der Wasser-Energiedosis handelt:

$$z_{ref} = 0,6 \cdot R_{50} - 0,1cm \quad (2.1)$$

Auf die Berechnung der Referenztiefe wird unter 2.10.6 näher eingegangen.

Mit Hilfe TBA Positioning Unit wird die Kammer mit einer Genauigkeit von 0,1 mm über das Handsteuergerät in die entsprechende Referenztiefe gebracht.

Für jede Energie werden pro Positionierung und bei beiden Polaritäten drei Messungen gemacht, aus denen später der Mittelwert gebildet wird. Nach Änderung der Polarität wird die Kammer erneut genullt und mit 1000 MU vorbestrahlt.

Die aufgenommenen Messwerte stellen keine Dosisangaben dar, sondern elektrische Ladung der Einheit Coulomb [C]. Diese muss mit Hilfe des Detektorkalibrierfaktors, welcher auf den Kalibrierscheinen der jeweiligen Kammer zu finden ist, und den nachfolgend beschriebenen Korrektionsfaktoren in eine Dosis der Einheit Gray [Gy] umgerechnet werden.

2.10 Korrektionsfaktoren

Die Notwendigkeit der Korrektionsfaktoren wird in DIN6800-2 (2016) [DIN16] wie folgt dargelegt: „Messungen der Wasser-Energiedosis finden in der Regel unter Bedingungen statt, bei denen nicht alle Einflussgrößen ihre Bezugswerte für die Kalibrierung annehmen (...). Die Auswirkungen der Abweichung der Einflussgrößen von ihren Bezugswerten müssen durch Korrekturen berücksichtigt werden. Ein Korrektionsfaktor berücksichtigt die Auswirkung einer Einflussgröße, die sich innerhalb ihres Nenngebrauchsbereiches ändert, während alle übrigen Einflussgrößen bei dem für sie festgelegten Bezugswert verbleiben.“

Die Gleichung zur Berechnung der Wasser-Energiedosis nach DIN6800-2 lautet wie folgt:

$$\text{nach 2008: } D = (M - M_0) \cdot N \cdot k_\rho \cdot k_h \cdot k_S \cdot k_P \cdot k_r \cdot k_T \cdot k_E \cdot k_{NR} \quad (2.2)$$

$$\text{nach 2016: } D = (M - M_0) \cdot N \cdot k_\rho \cdot k_h \cdot k_S \cdot k_P \cdot k_r \cdot k_T \cdot k_{E,M} \quad (2.3)$$

Die Wasser-Energiedosis D ergibt sich folglich aus der Differenz der unkorrigierten Anzeige M des Dosimeters und der Nullanzeige M_0 des Dosimeters ohne Bestrahlung, multipliziert mit dem Kalibrierfaktor für die Wasser-Energiedosis bei ^{60}Co -Gammastrahlung und dem Produkt aller zu berücksichtigenden Korrektionsfaktoren.

2.10.1 k_ρ - Korrektion der Luftdichte

Sowohl die Temperatur des Mediums um die Messkammer, als auch der vorherrschende Luftdruck beeinflussen die Messung. Für die Korrektur dieses Einflusses wird folgende Gleichung verwendet:

$$k_\rho = \frac{p_0 \cdot T}{p \cdot T_0} \quad (2.4)$$

Bei p_0 und T_0 handelt es sich um die Bezugswerte von Luftdruck (101,325 kPa) und Temperatur (293,15 K).

2.10.2 k_h - Korrektur der Luftfeuchte

Da der Korrekturfaktor k_h bei Werten zwischen 30 % und 75 % Luftfeuchtigkeit um weniger als 0,001 von 1 abweicht, wird dieser Einfluss meist nicht korrigiert. Die Luftfeuchtigkeit bei den Messungen für die vorliegende Arbeit war stets in erwähntem Bereich, weshalb ebenfalls von einer Korrektur dieses Einflusses abgesehen wird.

2.10.3 k_S - Korrektur unvollständigen Sättigung

Aufgrund von Rekombinationseffekten im Messvolumen wird stets weniger Ladung gemessen, als tatsächlich erzeugt wurde. Dieser Effekt wird mit Gleichung (2.5) korrigiert. D_p ist die Wasser-Energiedosis pro Puls am Messort in mGy, U die Kammerspannung in V. γ korrigiert Verluste durch Anfangsrekombinationen, δ Verluste durch Volumenrekombination.

$$k_S = 1 + \frac{\gamma + \delta \cdot D^p}{U} \quad (2.5)$$

2.10.4 k_P - Korrektur der Polarität

Der sowohl bei Elektronen-, als auch bei Photonenstrahlung auftretende Polaritätseffekt kommt dadurch zustande, dass eine unterschiedliche Anzahl an Elektronen aus dem umgebenden Material in die Messelektrode ein- und aus ihr austreten [vgl. DIN08]. Der Effekt wird mit nachfolgender Formel korrigiert:

$$k_P = \frac{\left(\frac{M_1 + M_2}{M_1}\right)_{Mess}}{\left(\frac{M_1 + M_2}{M_1}\right)_{Kal}} \quad (2.6)$$

M_1 entspricht dem Anzeigewert bei der gewöhnlich genutzten Polarität, M_2 dem Anzeigewert bei der entgegengesetzten Polarität.

2.10.5 k_r - Korrektur der Positionierung

In der DIN6800-2 aus dem Jahr 2008 wird die unterschiedliche Positionierung nur bei Kompaktkammern korrigiert. Anders als bei der Kalibrierung im Kalibrierlabor, bei der der Bezugspunkt der Kammer in die Bezugstiefe im Phantom gebracht wird, liegt bei der Messung der Wasser-Energiedosis der Bezugspunkt $r/2$ tiefer als der Messort. Werden die Kammern bei der Messung der Wasser-Energiedosis wie bei der Kalibrierung positioniert, die Verschiebung um $r/2$ also ignoriert, so muss dies mit folgender Gleichung korrigiert werden:

$$k_r = 1 + |\delta| \cdot \frac{r}{2} \quad (2.7)$$

Bei dem Faktor r handelt es sich um den Innenradius der äußeren Messelektrode, bei $|\delta|$ um den Betrag des relativen Gradienten der Tiefendosiskurve in der Bezugstiefe bei der Kalibrierung ($|\delta| = 0,006 \text{ mm}^{-1}$).

Wie bereits in der Einleitung aufgeführt, wurde im Entwurf der DIN aus dem Jahr 2016 die Positionierungsvorschrift verändert. Es wurde eine kammerabhängige Bezugspunktverschiebung eingeführt. Da bei der Kalibrierung weiterhin der Bezugspunkt der Ionisationskammer in die Bezugstiefe gebracht wird, hat sich die Berechnung des Korrekturfaktors geändert:

$$k_r = \frac{1}{1 + \delta_{Co} \cdot \Delta z_{Co}} \quad (2.8)$$

Hierbei sind Δz_{Co} die Verschiebung des effektiven Messpunktes, die für eine Dosismessung im ^{60}Co -Strahlungsfeld gilt und δ_{Co} der relative Gradient der Tiefendosiskurve unter Bezugsbedingungen für die Kalibrierung im ^{60}Co -Strahlungsfeld mit $-0,006 \text{ mm}^{-1}$.

2.10.6 k_E - Wasser-Energiedosis bei Elektronenstrahlung

Da ^{60}Co -Gammastrahlung nach wie vor die Bezugs-Strahlungsqualität darstellt, ist ein Korrekturfaktor von Nöten, der die Änderung des Ansprechvermögens der Ionisationskammer bei Verwendung von Elektronenstrahlung korrigiert.

In DIN 6800-2 von 2008 wird dieser Korrektionsfaktor k_E in einen von der Bauart unabhängigen Faktor k'_E , welcher das Massenstoßbremsverhältnis nach Bragg-Gray korrigiert, und einen von der Bauart abhängigen Faktor k''_E , welcher Abweichungen von den Bragg-Gray-Bedingungen korrigiert, zerlegt. Dabei wird die Referenztiefe k'_E nach folgender Formel berechnet:

$$k'_E = 1,106 - 0,1312 \cdot (R_{50})^{0,214} \quad (2.9)$$

k''_E ergibt sich zu:

$$k''_E = \frac{(p_{wall} \cdot p_{cav} \cdot p_{cel} \cdot p_{\Delta})_{R_{50}}}{(p_{wall} \cdot p_{cav} \cdot p_{cel} \cdot p_{\Delta})_{R_{50}}} \quad (2.10)$$

p_{wall} korrigiert die Abweichung des Wandmaterials von Wasser, p_{cav} die Störung der Fluenzverteilung der Elektronen durch Anwesenheit des luftgefüllten Hohlraums, p_{cel} den Einfluss der Mittelelektrode und p_{Δ} den Einfluss der Bauart auf die Abschneide-Energie Δ des beschränkten Massenstoßbremsvermögens.

Im DIN-Entwurf von 2016 werden diese beiden Faktoren nicht mehr einzeln berechnet. Hier ergeben sich für Messungen unter Referenzbedingungen folgende Gleichungen:

Flachkammern:
$$k_{E,R} = A + B e^{\frac{-R_{50}}{c}} \quad (2.11)$$

Kompaktkammern:
$$k_{E,R} = A + B * (R_{50})^{-C} \quad (2.12)$$

Die Werte der einzelnen Koeffizienten für die verwendeten Flachkammern, sind nachfolgender Tabelle zu entnehmen. Für Kompaktkammern sind in vorliegender Ausgabe des Entwurfes keine Werte vorgegeben. Deshalb wird k_E in dieser Arbeit rechnerisch ausschließlich nach den Formeln der DIN6800-2 aus dem Jahr 2008 ermittelt.

Tabelle 2: Werte der Parameter A, B und C zur Berechnung von $k_{E,R}$

Typ der Flachkammer	A	B	C
PTW 23343 Markus	0,8852	0,1008	3,826
PTW 34045 Advanced Markus	0,8864	0,1214	3,349
PTW 34001 Roos	0,8858	0,1206	3,511
IBA PPC40	0,8886	0,1173	3,510

Für die Berechnung dieses Korrektionsfaktors nach beiden DIN-Ausführungen ist der Wert der Halbwerttiefe R_{50} notwendig. Da die Tiefendosiskurven-Messung mit einer Ionisationskammer eine Tiefen-Ionenverteilung liefert, erhalten wir daraus die Halbwerttiefe der Ionendosis $R_{50, Ion}$. Diese muss in die Halbwerttiefe der Wasser-Energiedosis R_{50} umgerechnet werden. Beide DIN-Versionen liefern dazu Gleichungen:

$$\text{DIN 6800-2 (2008): } R_{50} = 1,029 \cdot R_{50, Ion} - 0,06 \text{ cm; } (R_{50, Ion} \leq 10 \text{ cm}) \quad (2.13)$$

$$R_{50} = 1,029 \cdot R_{50, Ion} - 0,37 \text{ cm; } (R_{50, Ion} > 10 \text{ cm}) \quad (2.14)$$

$$\text{DIN 6800-2 (2016): } R_{50} = 0,00171 \text{ cm}^{-1} \cdot R_{50, Ion}^2 + 1,00805 \cdot R_{50, Ion} - 0,00689 \quad (2.15)$$

Die Halbwerttiefe R_{50} der Wasser-Energiedosis wird zusätzlich für die Ermittlung der Referenztiefe z_{ref} verwendet. Diese ergibt sich aus folgender Formel:

$$z_{ref} = 0,6 \cdot R_{50} - 0,1 \text{ cm} \quad (2.16)$$

2.10.7 k_{NR} – Korrektion für Nicht-Referenzbedingungen

Für Messungen, die nicht unter Referenzbedingungen durchgeführt werden, muss der Korrektionsfaktor k_{NR} berechnet werden. Dabei wird eine abweichende Messposition von z_{ref} korrigiert, welche sich durch eine Änderung der beschränkten Massenstoßbremsvermögen $s_{w,a}^{\Delta}$ bemerkbar macht:

$$k_{NR}(z, R_{50}) = \frac{s_{w,a}^{\Delta}(z, R_{50})}{s_{w,a}^{\Delta}(z_{ref}, R_{50})} \cdot \frac{p(z, R_{50})}{p(z_{ref}, R_{50})}. \quad (2.17)$$

Z ist dabei die tatsächliche Messtiefe, p ein bauart- und strahlungsqualitätsabhängiger Störfaktor. Der Einfluss von p variiert dabei laut DIN-Entwurf 2016 [DIN16] „bei Positionierung der (...) Ionisationskammern nach (...) Vorschrift bis zu einer Messtiefe $z = R_{50}$ um weniger als $\pm 0,7\%$ (bezogen auf den Wert in der Tiefe z_{ref})“.

Da nun für $z = z_{ref}$ gelten muss: $k_{NR}(z, R_{50}) = 0$, wird der Faktor p zusammengefasst und berechnet über:

$$p = 1 / \frac{s_{w,a}^{\Delta}(z, R_{50})}{s_{w,a}^{\Delta}(z_{ref}, R_{50})} \quad (2.18)$$

Das Massenstoßbremsvermögen in der Referenztiefe wird wie folgt berechnet:

$$s_{w,a}^{\Delta}(z_{ref}, R_{50}) = 1,253 - 0,1487 \cdot (R_{50})^{0,214} \quad (2.19)$$

Für alle andere Tiefen z gilt folgende Formel:

$$s_{w,a}^{\Delta}(z, R_{50}) = \frac{a+bx+cx^2+dy}{1+ex+fx^2+gx^3+hy} \quad (2.20)$$

In der Formel steht x für $\ln\left(\frac{R_{50}}{1 \text{ cm}}\right)$ und $y = z/R_{50}$. In Tabelle 3 sind die Werte der Konstanten angegeben.

Tabelle 3: Werte der Konstanten für die Berechnung von $s_{w,a}^{\Delta}(z, R_{50})$

Konstante	Wert	Konstante	Wert
a	1,0752	e	-0,42806
b	-0,50867	f	0,06463
c	0,08867	g	0,003085
d	-0,08402	h	-0,1246

2.10.8 Werte Korrektionsfaktoren für verwendete Kammern

Die Korrektionsfaktoren werden nach den Vorgaben der vorhergehenden Unterkapitel berechnet. Die Berechnung wird dabei, da sich nach den beiden DIN-Ausgaben unterschiedliche Positionierungen bereits für die Messung der Tiefendosiskurven und damit unterschiedliche Werte für die Halbwerttiefe R_{50} ergeben, für jede Kammer viermal durchgeführt. Nachfolgende Tabellen zeigen die Berechnung der Korrektionsfaktoren für die Advanced Markus-Kammer sowohl nach der DIN aus 2008 (Tabelle 4), als auch nach dem DIN-Entwurf von 2016 (Tabelle 5). Die Tabellen mit den Berechnungen für alle anderen Kammern sind in Anhang A2 zu finden.

Tabelle 4: Korrektionsfaktoren Roos-Kammer nach DIN 2008

		4E	6E	9E	12E	15E		
Luftdichte k_p $k_p = (P_0 * T) / (p * T_0)$	P_0	101,325	101,325	101,325	101,325	101,325	kPa	
	T_0	293,15	293,15	293,15	293,15	293,15	K	
	p	96,4	96,4	96,4	96,4	96,4	kPa	
	T	298,25	298,25	298,25	298,25	298,25	K	
Korrektionsfaktor $k_p =$		1,0694	1,0694	1,0694	1,0694	1,0694		
Luftfeuchte k_h	n.e.							
unvollständige Sättigung k_s (kammerabhängig)								
PTW 34001 Roos:								
γ [V]		0,06	0,06	0,06	0,06	0,06		
σ [V / mGy]		1,69	1,69	1,69	1,69	1,69		
D^P [mGy]		1,111	1,111	1,111	1,111	1,111		
U [V]		200	200	200	200	200		
ISZ [ms]		0,13	0,13	0,13	0,13	0,13		
Korrektionsfaktor $k_s =$		1,0097	1,0097	1,0097	1,0097	1,0097		
Polarität der Kammeranspannung k_p								
Korrektionsfaktor $k_p =$		1,0025	1,0017	1,0014	1,0017	1,001		
andere Temperatureffekte k_T	n.e.							
Strahlungsqualitätsindex k_E	$k_E = k_E^+ * k_E^-$							
$k_E^+ = 1,106 - 0,1312 * (R_{SO})^{0,214}$								
$R_{SO,ion} =$		1,374	2,380	3,614	4,984	6,215	in cm	
$R_{SO} =$		1,354	2,389	3,659	5,069	6,335		
$k_E^+ =$		0,9660	0,9479	0,9328	0,9203	0,9112		
Allgemein:	$k_E^{**} = \frac{(P_{wall} * P_{cav} * P_{cel} * P_{\Delta})_{R50}}{(P_{wall} * P_{cav} * P_{cel} * P_{\Delta})_{Co}}$						bei Flachkammern:	$k_E^{**} = \frac{(P_{wall} * P_{\Delta})_{R50}}{(P_{wall} * P_{cav} * P_{\Delta})_{Co}}$
aus Tabelle:	$k_E^{**} =$	0,9810	0,9810	0,9810	0,9810	0,9810		
(kammerabhängig)	(PTW Roos 34001)							
Korrektionsfaktor $k_E =$		0,9477	0,9299	0,9151	0,9028	0,8939		
Messung unter Nicht-Referenzbedingungen								
$z_{Ref} =$		0,712	1,333	2,095	2,941	3,701	in cm	
$z =$		0,71	1,33	2,10	2,94	3,70	in cm	
$p =$		1,0025	1,0017	1,0003	0,9992	0,9988		
$k_{NF} =$		0,9999	0,9999	1,0002	0,9999	1,0000		
Gesamt-Korrektionsfaktoren $k_f =$		1,026	1,006	0,990	0,976	0,966		

Tabelle 5: Korrektionsfaktoren Roos-Kammer nach DIN 2016

		4E	6E	9E	12E	15E	
Luftdichte k_p $k_p = (P_0 \cdot T) / (p \cdot T_0)$	P_0	101,325	101,325	101,325	101,325	101,325	kPa
	T_0	293,15	293,15	293,15	293,15	293,15	K
	p	96,4	96,4	96,4	96,4	96,4	kPa
	T	298,25	298,25	298,25	298,25	298,25	K
Korrektionsfaktor $k_p =$		1,0694	1,0694	1,0694	1,0694	1,0694	
Luftfeuchte k_h	n.e						
unvollständige Sättigung k_s (kammerabhängig)							
γ [V]		0,06	0,06	0,06	0,06	0,06	
σ [V / mGy]		1,69	1,69	1,69	1,69	1,69	
D^P [mGy]		1,111	1,111	1,111	1,111	1,111	
U [V]		200	200	200	200	200	
ISZ [ms]		0,13	0,13	0,13	0,13	0,13	
Korrektionsfaktor $k_s =$		1,0097	1,0097	1,0097	1,0097	1,0097	
Polarität der Kammeranspannung k_p							
Korrektionsfaktor $k_p =$		1,0011	1,0015	1,0016	1,0013	1,0013	
Positionierung der Ionisationskammer k_r		0,9976057					
andere Temperatureffekte k_T							
Strahlungsqualitätsindex k_E	$k_E = k_{E,R} \cdot k_{NR,E}$						
$R_{50,ion} =$		1,427	2,438	3,643	5,034	6,240	
$R_{50} =$		1,435	2,461	3,688	5,111	6,350	
$k_{E,R} =$		0,9659	0,9456	0,9280	0,9139	0,9056	
Messung unter Nicht-Referenzbedingungen							
$z_{Ref} =$		0,761	1,377	2,113	2,967	3,710	in cm
$z =$		0,76	1,38	2,11	2,97	3,71	in cm
$p =$		1,0025	1,0016	1,0002	0,9992	0,9988	
$k_{NR} =$		0,9999	1,0001	0,9999	1,0001	1,0000	
Gesamt-Korrektionsfaktoren $k_T =$		1,042	1,020	1,001	0,986	0,977	

3 Ergebnisse

3.1 Auswertung der Tiefendosiskurven

Bei der Auswertung der Tiefendosiskurven werden die Kurven, aufgenommen nach der DIN von 2008 und dem DIN-Entwurf von 2016, verglichen. Dabei wird im ersten Schritt eine optische Auswertung hinsichtlich der sichtbaren Bezugspunktverschiebung und des Eintrittsfensters vorgenommen. Im zweiten Schritt werden die Werte der Halbwerttiefen miteinander verglichen und der Bezugspunktverschiebung gegenübergestellt.

3.1.1 optische Auswertung

3.1.1.1 Roos-Kammer

Bei Betrachtung der auf das Maximum normierten Tiefendosiskurven der nach beiden DIN-Ausführungen positionierten Rooskammer ist die Bezugspunktverschiebung für alle Energien erkennbar (Abbildung 14). Die nach rechts verschobenen Kurven, positioniert nach DIN-Entwurf von 2016, weisen ein etwas längeres Eintrittsfenster auf und sind ansonsten parallel nach rechts verschoben.

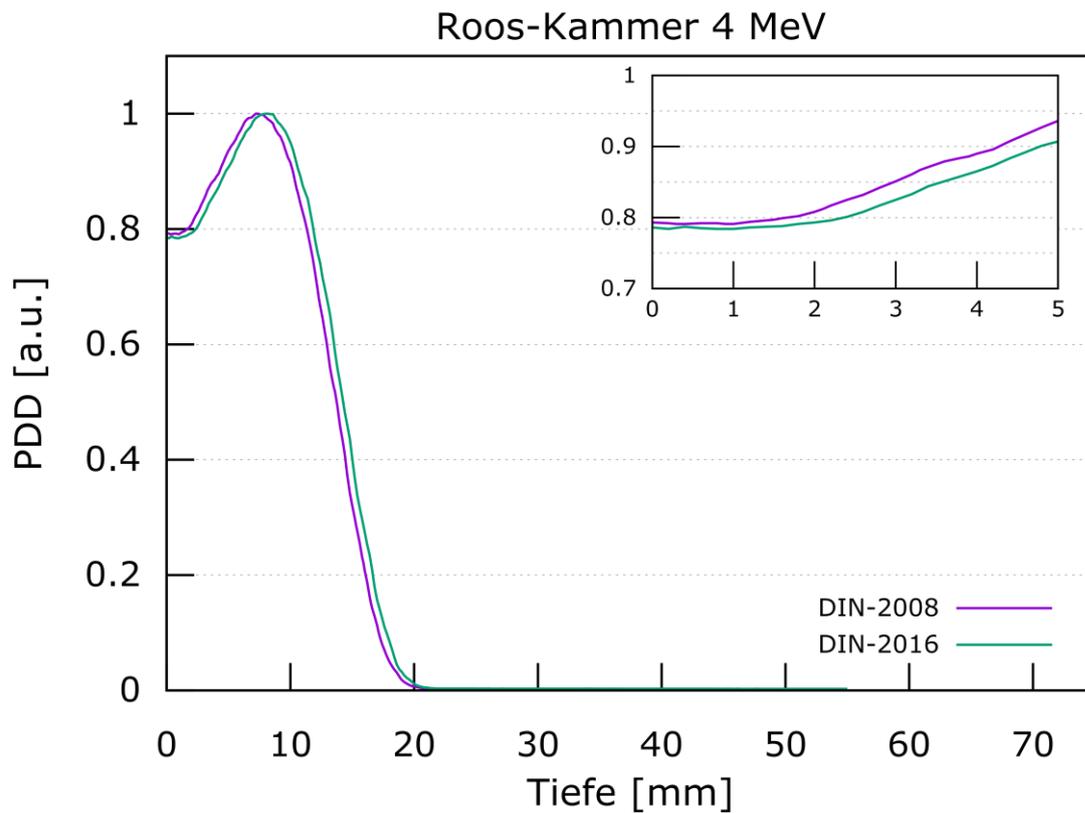


Abbildung 14: Tiefendosiskurven der Roos-Kammer bei 4 MeV

3.1.1.2 PPC40-Kammer

Aufgrund der sehr ähnlichen Bauart der PPC40-Kammer ist die optische Auswertung entsprechend der der Roos-Kammer. Auch hier ist die Bezugspunktverschiebung in allen Energien sichtbar und hat eine Parallel-Verschiebung nach rechts, sowie ein längeres Eintrittsfenster zur Folge (Abbildung 15).

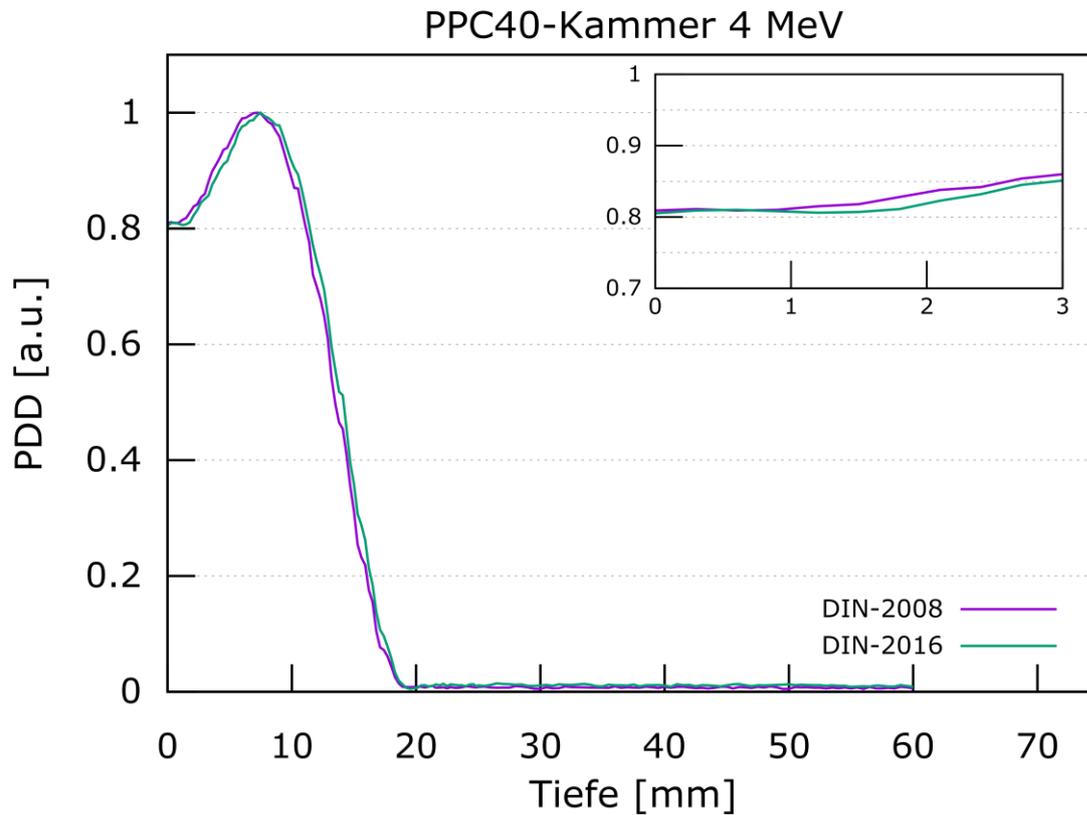


Abbildung 15: Tiefendosiskurven der PPC40-Kammer bei 4 MeV

3.1.1.3 Markus-Kammer

Die Markus-Kammer wurde, als weitere Flachkammer, nach dem DIN-Entwurf von 2016 ebenfalls Richtung Wasseroberfläche verschoben. Bei der Markus-Kammer wird zusätzlich, wie in Abbildung 16 zu sehen, eine höhere Dosis an der Wasseroberfläche nach Bezugspunktverschiebung deutlich, bevor die Kurven dann wieder parallel verlaufen.

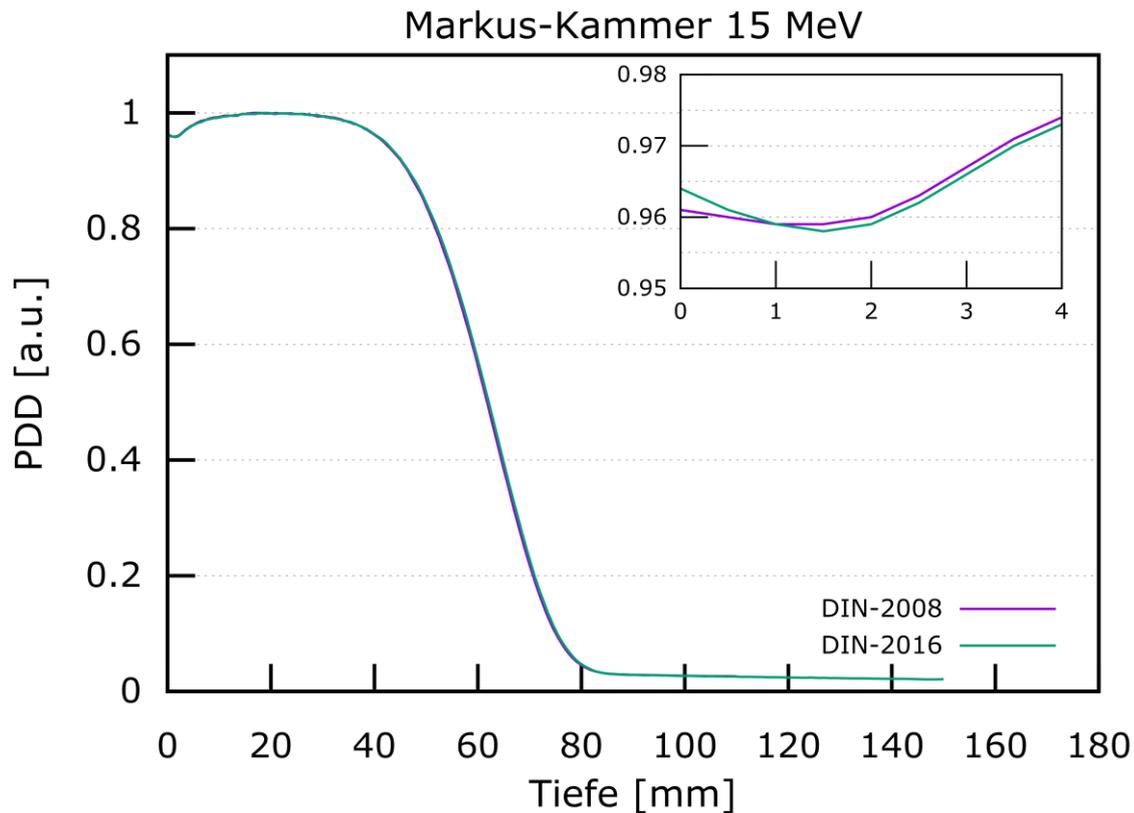


Abbildung 16: Tiefendosiskurven der Markus-Kammer bei 15 MeV

3.1.1.4 Advanced Markus-Kammer

Laut DIN-Entwurf von 2016 ist bei der Advanced Markus Kammer keine Bezugspunktverschiebung notwendig. Damit werden hier die Tiefendosiskurven für positive und negative Polarität bei gleicher Positionierung aufgenommen.

3.1.1.5 Farmer-Kammer

Die Bezugspunktverschiebung für Kompaktkammern wird nach der Formel in Tabelle 1 unter Kapitel 2.6 berechnet. Dabei ergibt sich für Kompaktkammern stets eine Verschiebung in die Tiefe. Dies hat eine Parallelverschiebung der Kurven nach links zur Folge (Abbildung 17). Das Eintrittsfenster wird entsprechend der Verschiebung im Vergleich zu der Kammerpositionierung nach DIN6800-2 2008 kürzer. Dieses Verhalten ist bei niedrigen Energien am deutlichsten ausgeprägt und

nimmt mit zunehmend höherer Energie im flachen Kurvenverlauf ab (Abbildung 18).

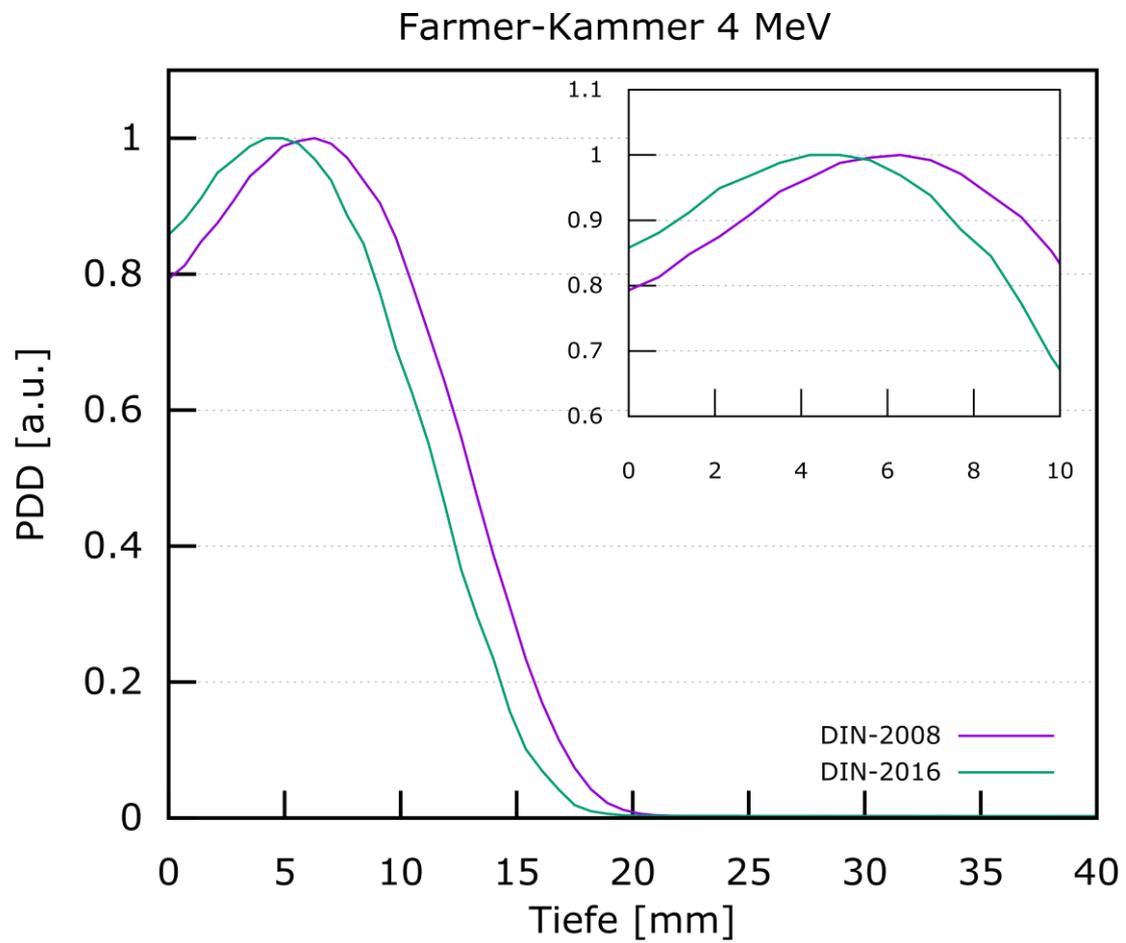


Abbildung 17: Tiefendosiskurven der Farmer-Kammer bei 4 MeV

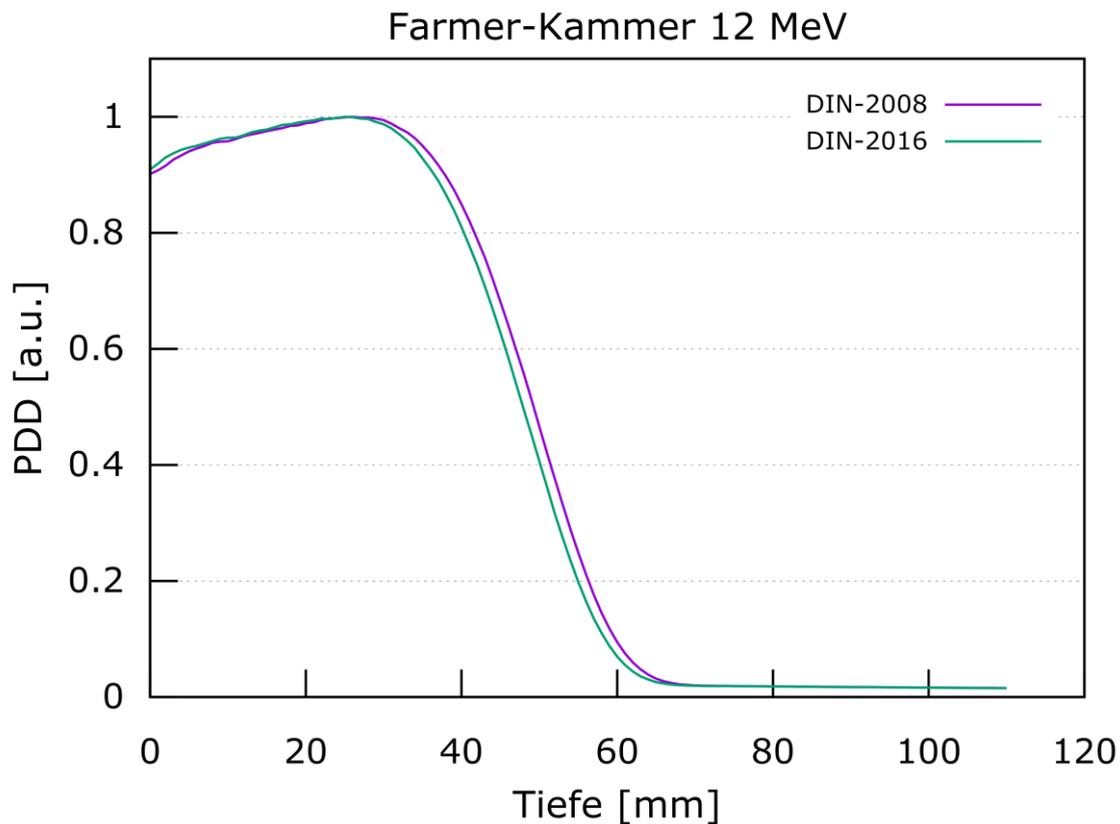


Abbildung 18: Tiefendosiskurven der Farmer-Kammer bei 12 MeV

3.1.2 Auswertung der Halbwerttiefe R_{50}

Da die Halbwerttiefe der Wasser-Energiedosis R_{50} eine wichtige Größe für die Berechnung der Referenztiefe und damit für alle weiterführenden Messungen ist, wird diese Größe genauer betrachtet.

Die Tiefendosiskurven werden vor der Bestimmung der Halbwerttiefe polaritätskorrigiert. Dafür wird in der Mephysto-Software aus den Kurven beider Polaritäten eine Durchschnittskurve gebildet. Aus dieser Kurve wird daraufhin für jede Kammer und jede Energie die Halbwerttiefe der Ionendosis abgelesen. Diese wird im Anschluss nach den Formeln in Kapitel 2.10.6 in die Wasser-Energiedosis umgerechnet.

3.1.2.1 Roos-Kammer

Die Bezugspunktverschiebung der Roos-Kammer beträgt nach DIN-Entwurf 0,4 mm hin zur Wasseroberfläche. Diese Verschiebung ist, wie in nachfolgender Tabelle zu sehen, nicht direkt auf die Tiefe der R_{50} Wasser-Energiedosis übertragbar. Die Halbwerttiefe weicht vor allem bei niedrigen Energien, 4 MeV und 6 MeV, deutlich von der Bezugspunktverschiebung ab. Dies ist dem sehr steilen Dosisverlauf der niedrigen Elektronenenergien geschuldet.

Tabelle 6: R_{50} Wasserenergiedosis der Roos-Kammer (in cm)

Roos						
DIN	Spannung	4 MeV	6 MeV	9 MeV	12 MeV	15 MeV
2008	200	1,354	2,389	3,659	5,069	6,335
2016	200	1,435	2,461	3,688	5,111	6,350
Δ	200	0,081	0,072	0,029	0,042	0,015

3.1.2.2 PPC40-Kammer

Die Flachkammer PPC40 von IBA wird ebenfalls um 0,4 mm zur Wasseroberfläche hin verschoben. Dabei ergibt sich für die Halbwerttiefen ein ähnliches Bild wie bei der Roos-Kammer. Für 4 MeV ist der Tiefenunterschied erheblich größer als die Bezugspunktverschiebung. Der Unterschied nimmt, wie auch bei der Roos-Kammer, von den niedrigen zu den hohen Energien ab.

Tabelle 7: R_{50} Wasserenergiedosis der PPC40-Kammer (in cm)

PPC40						
DIN	Spannung	4 MeV	6 MeV	9 MeV	12 MeV	15 MeV
2008	300	1,327	2,380	3,667	5,079	6,389
2016	300	1,424	2,432	3,715	5,116	6,412
Δ	300	0,097	0,052	0,048	0,037	0,023

3.1.2.3 Markus-Kammer

Für die Markuskammer ist im DIN-Entwurf von 2016 eine Bezugspunktverschiebung von -0,3 mm vorgesehen. Dadurch ergeben sich folgende Halbwerttiefen:

Tabelle 8: R_{50} Wasserenergiedosis der Markus-Kammer (in cm)

Markus						
DIN	Spannung	4 MeV	6 MeV	9 MeV	12 MeV	15 MeV
2008	200	1,288	2,314	3,597	5,005	6,298
2016	200	1,346	2,357	3,621	5,027	6,319
Δ	200	0,058	0,043	0,024	0,022	0,021

Der Tiefenunterschied liegt bei allen Energien außer den 4 MeV nahe der Bezugspunktverschiebung. Für 4 MeV Energien ist der Unterschied der Halbwerttiefe knapp doppelt so groß wie die Bezugspunktverschiebung, während sie bei 15 MeV um 0,1 mm von der Bezugspunktverschiebung abweicht.

3.1.2.4 Advanced-Markus-Kammer

Für die Advanced-Markus-Kammer ist laut DIN-Entwurf keine Bezugspunktverschiebung vorgesehen. Der Unterschied der Halbwerttiefen ergibt sich in folgender Tabelle somit ausschließlich durch die veränderte Umrechnung der Tiefen-Ionen-dosisverteilung in die Wasser-Energiedosis. Die entsprechenden Formeln sind in Kapitel 2.10.6 gegeben.

Tabelle 9: R_{50} Wasserenergiedosis der Advanced-Markus-Kammer (in cm)

Advanced Markus						
DIN	Spannung in V	4 MeV	6 MeV	9 MeV	12 MeV	15 MeV
2008	300	1,329	2,360	3,634	5,035	6,301
2016	300	1,357	2,374	3,634	5,026	6,290
Δ	300	0,028	0,014	0,000	-0,009	-0,011

Die Tabelle zeigt keinen Unterschied der Halbwerttiefe für 9 MeV. Bei zunehmender Energie verlagert sich die Halbwerttiefe um etwa 0,1 mm nach oben, für niedrigere Energien um ca. 0,1 mm (6 MeV) bzw. rund 0,3 mm (4 MeV) in die Tiefe.

3.1.2.5 Farmer-Kammer

Die vorliegenden Kompaktkammern müssen laut DIN-Entwurf um 1,525 mm nach unten verschoben werden. Aufgrund der begrenzten Genauigkeit der Positioniereinheit des Wasserphantoms wird die Kammer in dieser Arbeit nur um 1,5 mm verschoben.

Die durch die Repositionierung hervorgerufene Linksverschiebung der Tiefendosiskurve bewirkt eine, im Vergleich zur DIN von 2008, hin zur Wasseroberfläche verschobene Halbwerttiefe. Dies zeigt sich für alle Energien. Die Halbwerttiefen weichen dabei zwischen -0,1 mm (15 MeV, Kammer 01) und 0,167 mm (15 MeV, Kammer 02) ab.

Tabelle 10: R_{50} Wasserenergiedosis der Farmer-Kammer 00 (in cm)

Farmer 00						
DIN	Spannung in V	4 MeV	6 MeV	9 MeV	12 MeV	15 MeV
2008	400	1,277	2,298	3,589	5,009	6,278
2016	400	1,166	2,167	3,468	4,878	6,115
Δ	400	-0,111	-0,131	-0,121	-0,131	-0,163

Tabelle 11: R_{50} Wasserenergiedosis der Farmer-Kammer 01 (in cm)

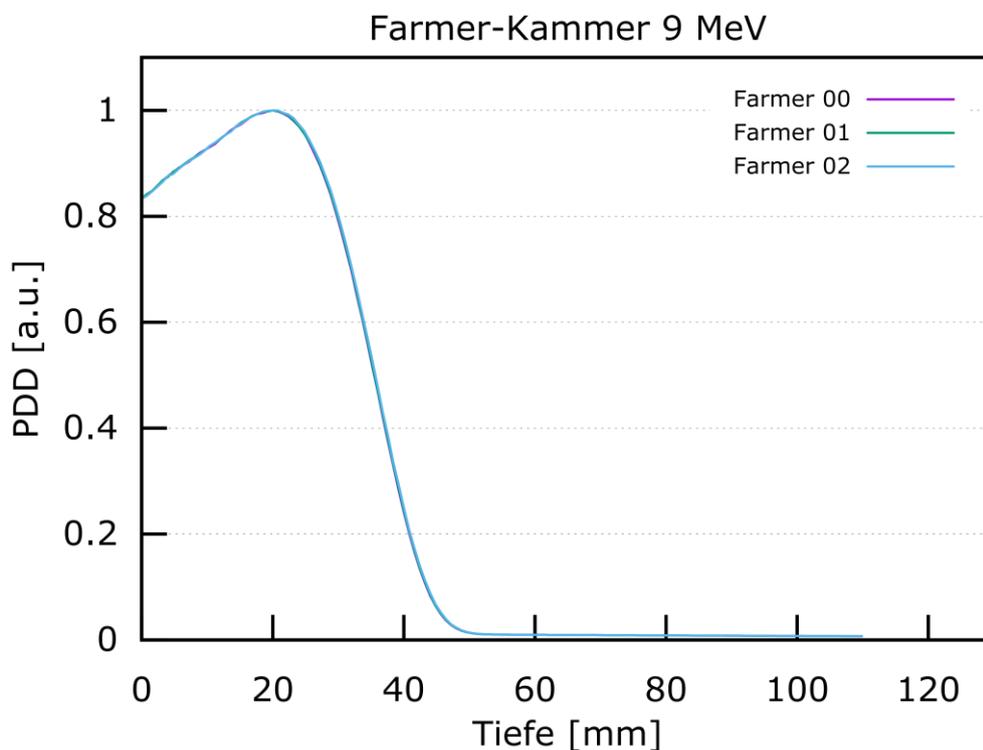
Farmer 01						
DIN	Spannung in V	4 MeV	6 MeV	9 MeV	12 MeV	15 MeV
2008	400	1,286	2,304	3,592	5,011	6,275
2016	400	1,165	2,158	3,456	4,860	6,110
Δ	400	-0,122	-0,146	-0,136	-0,151	-0,100

Tabelle 12: R_{50} Wasserenergiedosis der Farmer-Kammer 02 (in cm)

Farmer 02						
DIN	Spannung in V	4 MeV	6 MeV	9 MeV	12 MeV	15 MeV
2008	400	1,300	2,322	3,607	5,017	6,301
2016	400	1,173	2,177	3,457	4,865	6,134
Δ	400	-0,127	-0,145	-0,150	-0,152	-0,167

3.1.2.6 Stabilität Farmer-Kammer

Wichtig für den Einsatz eines Kammertyps für die Absolutdosimetrie ist die Stabilität innerhalb dieses Kammertypes, weshalb die Messungen mit drei bauartgleichen Farmer-Kammern durchgeführt werden. Sowohl in nachfolgender Abbildung 19, als auch in den Tabellen unter 3.1.2.5, ist eine hohe Stabilität erkennbar. Die Tiefendosiskurven liegen nahezu aufeinander, was sich in den gering voneinander abweichenden Halbwerttiefen widerspiegelt. Die größte Abweichung zwischen zwei Farmer-Kammer beträgt weniger als 0,03 mm.

**Abbildung 19:** Tiefendosiskurven Farmer-Kammer bei 9 MeV

3.2 Auswertung der Absolutdosimetrie

Für die Auswertung der Absolutdosimetrie werden die unter 2.10.8 und im Anhang zu findenden Korrekturfaktoren (k_i) der einzelnen Messkammern und Messbedingungen mit dem Mittelwert der Absolutdosis-Messung pro Energie und Polarität, sowie mit dem Detektor-Kalibrierfaktor ($N_{D,w}$) multipliziert. Verglichen werden die Dosiswerte zwischen den beiden DIN-Ausgaben.

3.2.1 Roos-Kammer

Durch die Bezugspunktverschiebung steigt für die Roos-Kammer die Dosis im effektiven Messpunkt leicht an. Der Unterschied ist für 9 MeV mit 1,01 % am niedrigsten und für 4 MeV mit 1,62 % am höchsten.

Tabelle 13: Absolutdosimetrie Roos-Kammer

DIN	4 MeV	6 MeV	9 MeV	12 MeV	15 MeV
2008	1,034	1,029	0,988	0,989	0,83
2016	1,051	1,044	0,999	1,001	0,995
Δ	1,62 %	1,44 %	1,10 %	1,20 %	1,21 %

3.2.2 PPC40-Kammer

Für die PPC40-Kammer steigt die Dosis ebenfalls durch die Bezugspunktverschiebung an. Die Abweichung beträgt zwischen 2,48 % für 4 MeV und 1,75 % für 12 MeV.

Tabelle 14: Absolutdosimetrie PPC40-Kammer

DIN	4 MeV	6 MeV	9 MeV	12 MeV	15 MeV
2008	1,061	1,055	1,011	1,013	1,003
2016	1,088	1,079	1,031	1,031	1,024
Δ	2,48 %	2,22 %	1,94 %	1,75 %	2,05 %

3.2.3 Markus-Kammer

Auch bei der Markus-Kammer erhöht sich die Dosis in der effektiven Messtiefe. Dabei nimmt die Abweichung mit steigender Energie von 4,48 % (4 MeV) auf 2,10 % (15 MeV) ab.

Tabelle 15: Absolutdosimetrie Markus-Kammer (+300V, DIN 2008)

DIN	4 MeV	6 MeV	9 MeV	12 MeV	15 MeV
2008	1,023	1,023	0,983	0,987	0,977
2016	1,071	1,059	1,010	1,008	0,998
Δ	4,48 %	3,40 %	2,67 %	2,08 %	2,10 %

3.2.4 Advanced-Markus-Kammer

Die veränderte Berechnung der Halbwerttiefe und die damit verbundene neue Positionierung bewirkt in der Absolutdosimetrie der Advanced-Markus-Kammer eine erhöhte Dosismessung. Diese nimmt mit steigender Elektronenenergie von +1,61 % bei 4 MeV auf 0,85 % bei 15 MeV ab.

Tabelle 16: Absolutdosimetrie Advanced-Markus-Kammer (+300V, DIN 2008)

DIN	4 MeV	6 MeV	9 MeV	12 MeV	15 MeV
2008	1,097	1,099	1,056	1,060	1,054
2016	1,115	1,114	1,067	1,070	1,063
Δ	1,61 %	1,35 %	1,03 %	0,93 %	0,85 %

3.2.5 Farmer-Kammer

Der Einfluss der neuen Positionierungsvorschrift ist nun im Fall der Farmer-Kammern nicht sofort abzuleiten, da in dem DIN-Entwurf von 2016 noch keine Werte des Korrekturfaktors k_E gegeben sind.

Tabelle 17: Absolutdosimetrie Farmer-Kammer 00

DIN	4 MeV	6 MeV	9 MeV	12 MeV	15 MeV
2008	1,014	1,027	0,998	0,992	0,985
2016	1,102	1,138	1,107	1,116	1,113
Δ	7,99 %	9,75 %	10,75 %	11,11 %	11,50 %

Tabelle 18: Absolutdosimetrie Farmer-Kammer 01

DIN	4 MeV	6 MeV	9 MeV	12 MeV	15 MeV
2008	1,012	1,026	0,988	0,991	0,984
2016	1,088	1,126	1,094	1,104	1,101
Δ	8,08 %	8,88 %	9,69 %	10,24 %	10,63 %

Tabelle 19: Absolutdosimetrie Farmer-Kammer 02

DIN	4 MeV	6 MeV	9 MeV	12 MeV	15 MeV
2008	1,008	1,022	0,986	0,989	0,980
2016	1,087	1,123	1,092	1,102	1,098
Δ	7,27 %	8,99 %	9,71 %	10,25 %	10,75 %

Diskussion

4.1 Tiefendosiskurven

Wie zu erwarten war ist die Bezugspunktverschiebung in den Tiefendosiskurven auf den ersten Blick sichtbar. Aufgrund des steileren Kurvenverlaufes bei niedrigen Elektronenenergien ist sie in diesen Tiefendosiskurven ausgeprägter als in den flachen Kurven höherer Elektronenenergien. Dies spiegelt sich ebenfalls in den Werten der Halbwerttiefe wieder. Ein direkter Bezug zu den Werten der Bezugspunktverschiebung ist allerdings vor allem in den niedrigen Elektronenenergien nicht immer möglich. Grund dafür ist der steile Kurvenverlauf, welcher sehr empfindlich auf kleinste Ungenauigkeiten, beispielsweise in der Positionierung, reagiert.

Da es sich bei den Tiefendosiskurven um eine relative Messung handelt, ist die Genauigkeit des Messaufbaus die größte Fehlerquelle. Relevant ist dabei vor allem die Genauigkeit der Positionierungseinheit mit 0,1 mm. So muss die Bezugspunktverschiebung der Farmer-Kammern auf 1,5 mm statt 1,525 mm gerundet werden. Auch der Center-Check der Mephysto-Software hat eine Genauigkeit von 0,1 mm, sodass die Genauigkeit der Kammerpositionierung im Submillimeterbereich gegeben ist. Durch den sehr steilen Kurvenverlauf, vor allem bei niedrigen Elektronenenergien, wirkt sich allerdings auch jede Ungenauigkeit in der Positionierung entsprechend deutlich aus.

4.2 Absolutdosimetrie

4.2.1 Flachkammern

Insgesamt ergibt sich für jede Flachkammer bei jeder Energie eine höhere Dosis in der Absolutdosimetrie nach dem DIN-Entwurf von 2016. Während die Bezugspunktverschiebung durch die neue Berechnung des Korrekturfaktors k_r und der Halbwerttiefe der Wasser-Energiedosis R_{50} nahezu egalisiert wird, sich also in der Absolutdosimetrie ohne Anwendung des $k_{E,R}$ -Faktors kaum Abweichungen in den Messwerten ergeben, folgt durch die Anwendung der aktualisierten Berechnung des $k_{E,R}$ -Faktors diese Erhöhung der Absolutdosis um bis zu 4,5 %. Da die neuen Berechnungen des DIN-Entwurfes auf neuen Erkenntnissen und aktuellsten Monte-Carlo-Berechnungen und Simulationen beruhen, muss davon ausgegangen werden, dass diese höhere Dosis der Realität näher kommt als die Berechnungen nach aktuell gültiger DIN. Die Verifikation der Werte des $k_{E,R}$ -Faktors durch andere Institutionen ist bereits geplant.

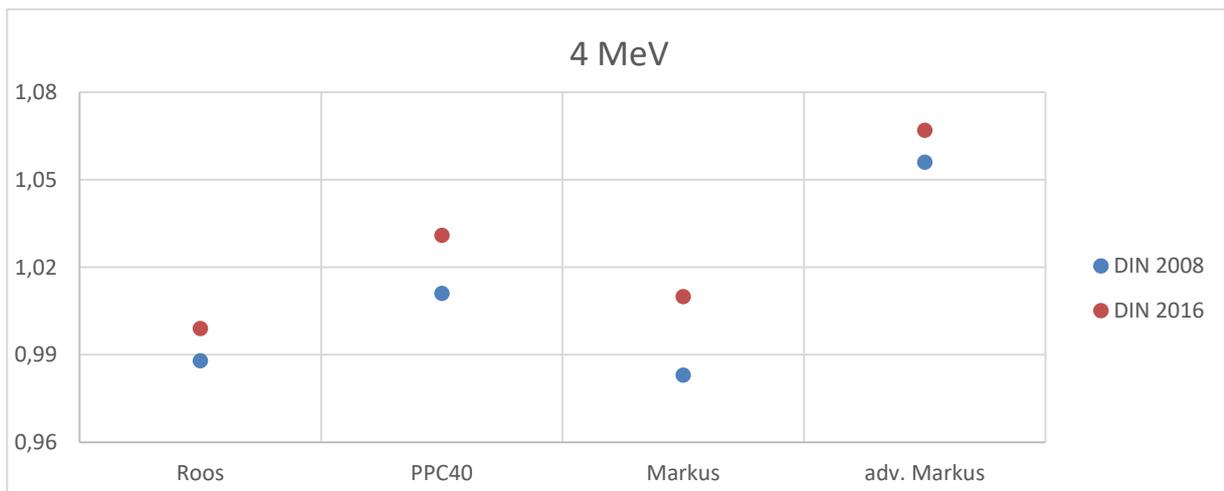


Abbildung 20: Absolutdosimetrie Flachkammern 4 MeV

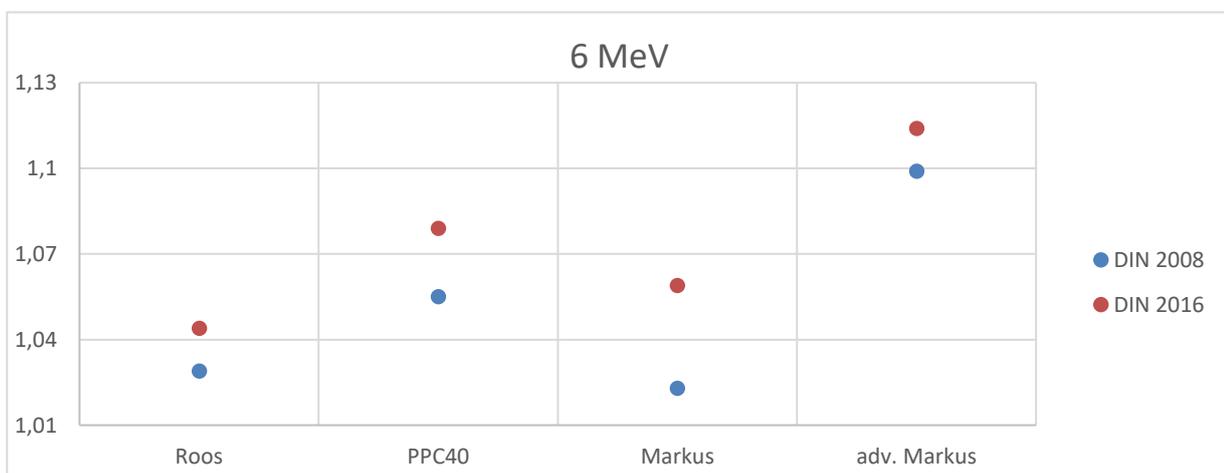


Abbildung 21: Absolutdosimetrie Flachkammern 6 MeV

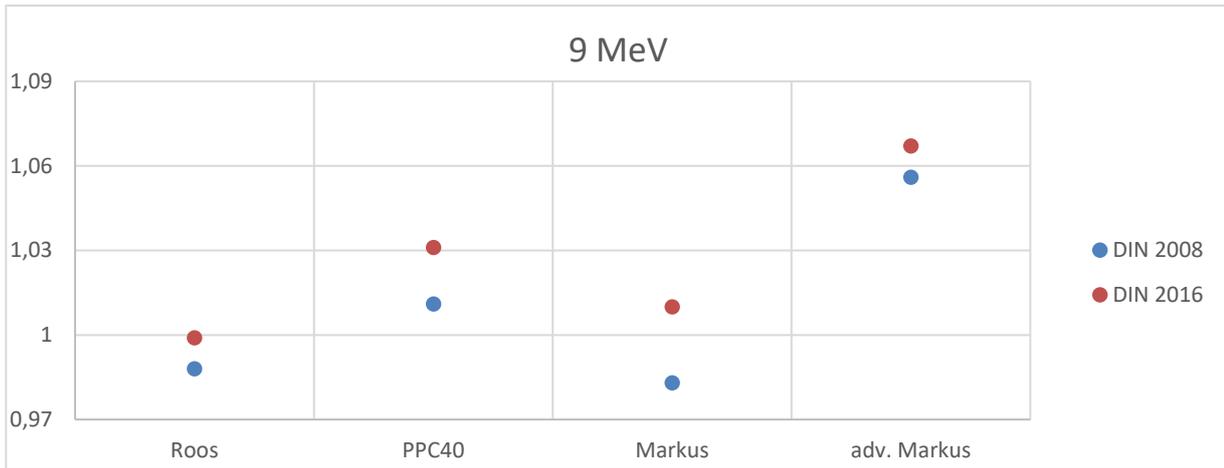


Abbildung 22: Absolutdosimetrie Flachkammern 9 MeV

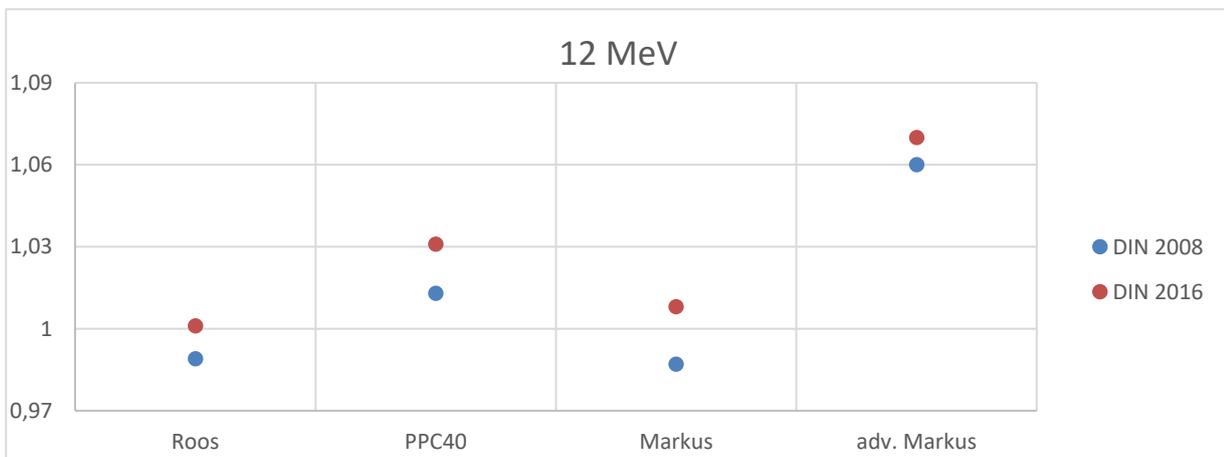


Abbildung 23: Absolutdosimetrie Flachkammern 12 MeV

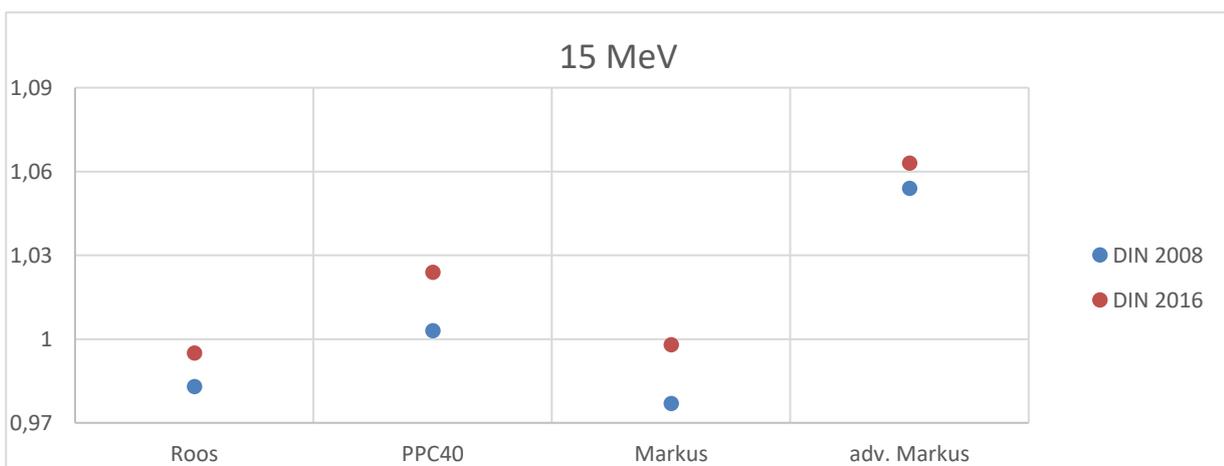


Abbildung 24: Absolutdosimetrie Flachkammern 15 MeV

Auffällig in der Absolutdosimetrie mit den Flachkammern ist die deutlich höhere gemessene Dosis mit der Advanced-Markus-Kammer. Der Unterschied beträgt nach DIN 2008 bis zu 7,9 %, nach DIN-Entwurf 2016 bis zu 6,9 %. Dieses Ergebnis zeigt sich auch nach mehrmaliger Wiederholung der Messungen. Der Dosisunterschied zu den anderen Flachkammern bleibt auch nach Anwendung der Korrekturfaktoren bestehen. Da keine Arbeiten zu einem Vergleich der verwendeten Flachkammertypen in der Absolutdosimetrie gefunden werden konnten und auch der Hersteller einen solchen Dosisunterschied nicht zu erklären weiß, muss zum jetzigen Zeitpunkt von einem nicht nachvollziehbaren Messfehler ausgegangen werden. Allerdings liegt die Vermutung nahe, dass trotz Kalibrierung kurze Zeit vor Durchführung der Messungen, diese große Abweichung mit dem Detektor-Kalibrierfaktor in Verbindung gebracht werden muss.

Die geringeren Abweichungen unter den restlichen Flachkammern sind mit kleineren Messunsicherheiten zu erklären, denn auch in der Absolutdosimetrie spielt die Genauigkeit der Positionierung eine große Rolle. Die aus den Halbwertiefen ermittelten Referenziefen können mit einer Genauigkeit der Positionierungseinheit von 0,1 mm nicht exakt angefahren werden. Diese Abweichungen werden allerdings mit dem Korrekturfaktor k_{NR} aufgefangen. Die Unsicherheit dieses Korrekturfaktors hängt dabei von mehreren Einflüssen, wie beispielsweise der Feldgröße und dem Quellen-Oberflächen-Abstand, ab. Genaue Angaben zu der Messunsicherheit können laut DIN nicht gegeben werden. Verwiesen wird auf die Genauigkeit des Störungsfaktors p mit $\pm 0,7 \%$, und die für das Massen-Stoßbremsvermögen in Tiefen $z \neq z_{ref}$ mit weniger als 0,4 % (für $z \leq R_{50}$).

Um große Unterschiede zwischen der Raumtemperatur und der Wassertemperatur zu vermeiden, wurde das Wasserphantom frühzeitig im Bestrahlungsbunker gelagert. Die Wassertemperatur wurde von einem Quecksilberthermometer der Firma PTW abgelesen. Die Genauigkeit dieses Thermometers beträgt 1°C . Der Druck im Raum wurde von dem OPUS 10 Barometer der Firma Lufft mit einer angegebenen Genauigkeit von 0,1 hPa abgelesen. Bereits geringe Abweichungen der Temperatur- und Druckwerte haben einen großen Einfluss auf die Höhe des Korrekturfaktors.

Andere Größen sind ebenfalls mit Unsicherheiten behaftet. Dabei wird die Unsicherheit des Kalibrierfaktors vom Hersteller mit 1,5 % ($k = 2$) angegeben, die relative Standardmessunsicherheit des Korrekturfaktors der Luftdichte, sowie der unvollständigen Sättigung und der Polarität der Kammerspannung beträgt etwa 0,1 %.

Die Flachkammern weisen nach DIN-Entwurf von 2016 in den Halbwertiefen eine maximale Abweichung von 1,22 mm auf, was einer Abweichung von maximal 1 % entspricht. Die Halbwertiefen liegen also alle innerhalb einer Abweichung von 1 %. Entsprechend nah beieinander liegen die Referenziefen aller Flachkammern.

4.2.2 Farmer-Kammern

Bei dem Vergleich der Absolutdosimetrie der Kompaktkammern nach DIN 2008 untereinander ist festzustellen, dass die Abweichung, wie bereits in den Tiefendosiskurven zu sehen war, gering ist. Die Werte sind mit einer maximalen Abweichung von 0,6 % sehr stabil innerhalb dieser Kammerart, weshalb sie in der Absolutdosimetrie der Elektronen < 10 MeV als einsetzbar eingestuft wird.

Die Dosisabweichung wird auch hier vor allem durch den Korrektionsfaktor $k_{E,R}$ bestimmt.

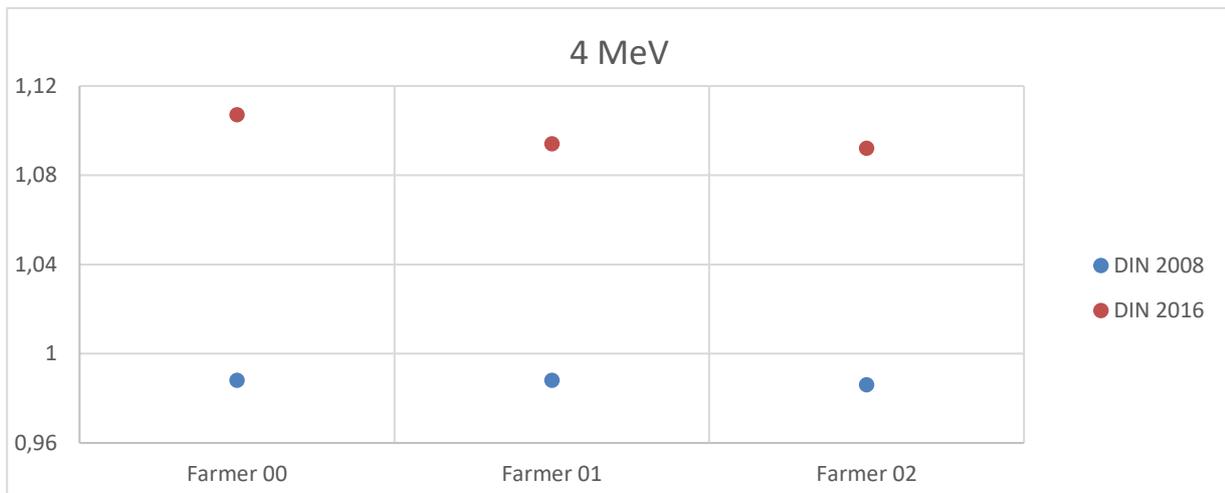


Abbildung 25: Absolutdosimetrie Farmer-Kammern 4 MeV

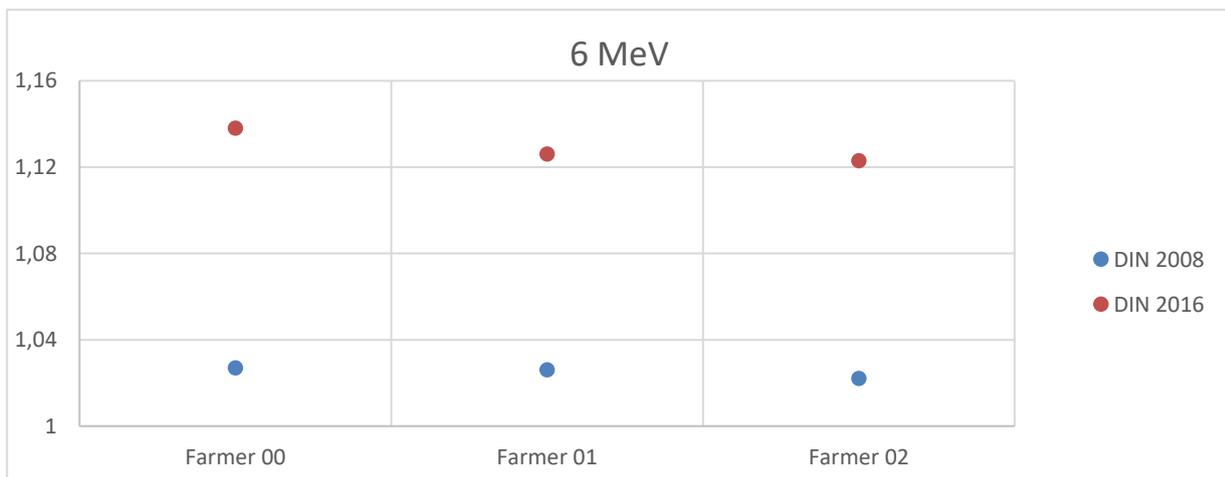


Abbildung 26: Absolutdosimetrie Farmer-Kammern 6 MeV

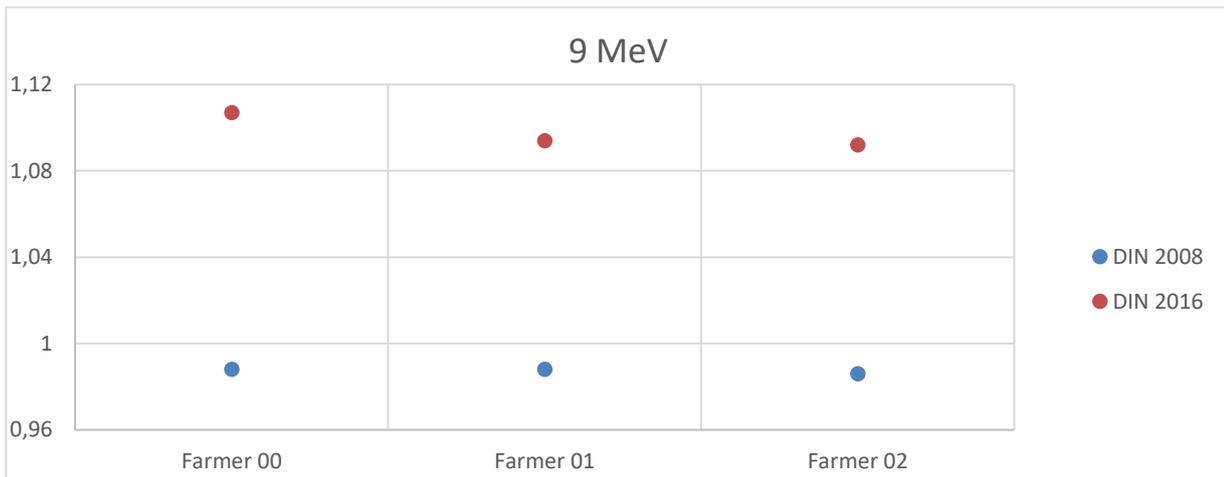


Abbildung 27: Absolutdosimetrie Farmer-Kammern 9 MeV

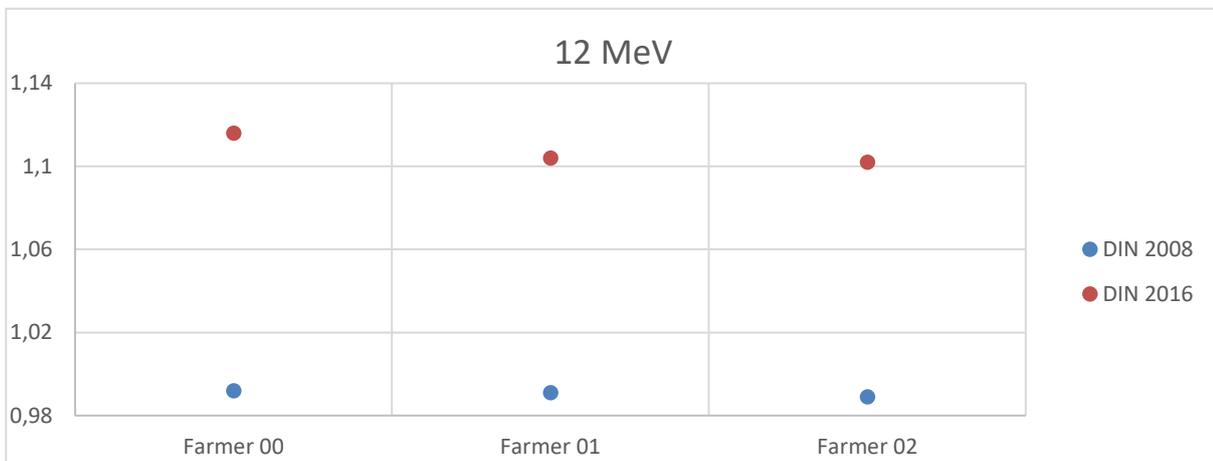


Abbildung 28: Absolutdosimetrie Farmer-Kammern 12 MeV

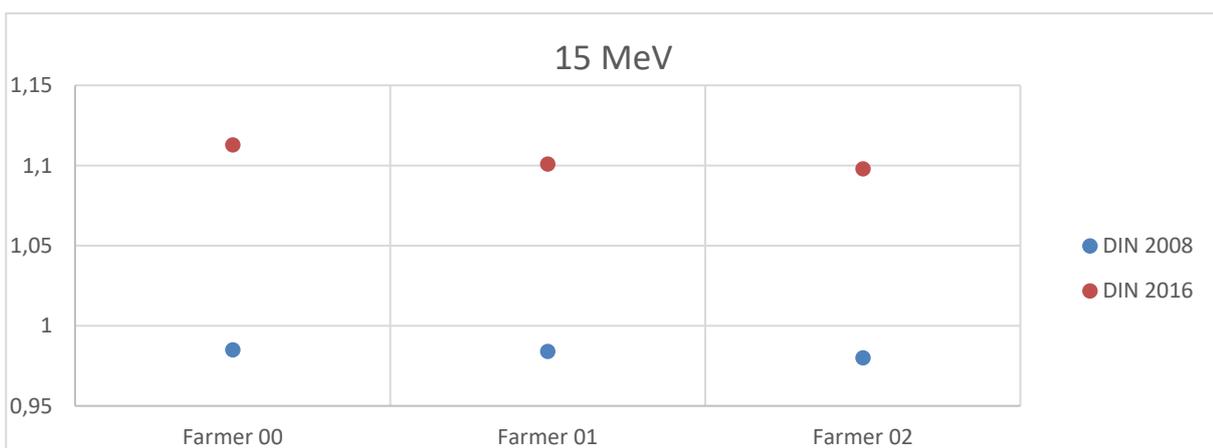


Abbildung 29: Absolutdosimetrie Farmer-Kammern 15 MeV

4.3 Berechnung $k_{E,R}$ -Faktor

Wie bereits erwähnt ist in dem DIN-Entwurf von 2016 kein Korrektionsfaktor k_E für Kompaktkammern angegeben. Nachdem ein Ziel der vorliegenden Arbeit darin besteht, herauszufinden ob Kompaktkammern ebenfalls für die Absolutdosimetrie von Elektronenstrahlung verwendet werden können, wird davon ausgegangen, dass durch den k_E -Faktor die nahezu gleiche Dosis wie bei Messungen mit Flachkammern erreicht werden muss. Diese Methode wird ebenfalls in Anhang C des DIN-Entwurfes beschrieben. Empfohlen wird darin ein Primärnormal, beispielsweise ein Wasserkalorimeter, oder gegebenenfalls ein hochwertiges Sekundärnormal der Referenzklasse. In dieser Arbeit wird für die Berechnung der Mittelwert für jede Energie aus allen drei Farmerkammern (\bar{D}) gebildet durch des entsprechenden Dosiswert der Roos-Kammer geteilt. Das Ergebnis ergibt den $k_{E,R}$ -Faktor.

$$k_{E,R} = \frac{\bar{D}_{Farmer}}{D_{Roos}} \quad (3.1)$$

Tabelle 20: Berechnung des Korrektionsfaktor $k_{E,R}$

	4 MeV	6 MeV	9 MeV	12 MeV	15 MeV
Mittelwert Dosis Farmerkammer	1,092	1,129	1,098	1,107	1,104
Dosis Roos-Kammer	1,051	1,044	0,999	1,001	0,995
$k_{E,R}$ -Faktor	0,962	0,925	0,910	0,904	0,901

Der Faktor wird nachfolgend mit dem Mittelwert des $k_{E,R}$ -Faktors aus der DIN von 2008, berechnet nach Formel (2.10), verglichen.

Tabelle 21: Abweichung des Korrektionsfaktors k_E für Farmer-Kammern

	4 MeV	6 MeV	9 MeV	12 MeV	15 MeV
$k_{E,R}$ -Faktor (2016)	0,962	0,925	0,910	0,904	0,901
k_E -Faktor (2008)	0,918	0,908	0,901	0,896	0,892
Δ	+4,80 %	+1,87 %	+1,00 %	+0,89 %	+1,01 %

Der Faktor, bestimmt nach der aktuell gültigen DIN, weicht von den aus dem Vergleich mit der Roos-Kammer gewonnenen Werten für 4 MeV um 4,8 % ab. Bei

steigender Energie wird der Faktor kleiner und ab 9 MeV stabil bei etwa 1 % Abweichung. Die hohe Abweichung der 4 MeV bei der Farmer-Kammer ist durch die Art der Berechnungsformel bedingt. Bei der Formel handelt es sich um eine Potentialgleichung, abhängig von der Halbwerttiefe R_{50} . Ist der Wert für die Halbwerttiefe sehr klein, ergibt sich ein im Vergleich zur Berechnung nach aktueller DIN sehr viel höherer k_E -Faktor. Die Parameter A, B und C, welche im DIN-Entwurf von 2016 zur Berechnung des $k_{E,R}$ - Faktors für Flachkammern gegeben sind, werden für die Farmer-Kammern mathematisch mit Hilfe eines nonlinearen Fits auf Formel 2.12 in der Software Maple folgende Werte ermittelt:

Tabelle 22: Koeffizienten A, B und C des $k_{E,R}$ -Faktors der Farmer-Kammern

	A	B	C
Farmer-Kammer	0,8928	0,0850	1,2733

Ein Vergleich des k_E -Faktors berechnet nach den Formeln beider DIN-Ausgaben ergibt für die Roos-Kammer folgende Tabelle:

Tabelle 23: Abweichung des Korrektionsfaktors k_E für die Roos-Kammer

	4 MeV	6 MeV	9 MeV	12 MeV	15 MeV
$k_{E,R}$ - Faktor (2016)	0,966	0,946	0,928	0,914	0,906
k_E - Faktor (2008)	0,948	0,930	0,915	0,903	0,894
Δ	+1,90 %	+1,72 %	+1,42 %	+1,22 %	+1,34 %

Zu sehen ist ein der Farmer-Kammer ähnliches Bild. Die maximale Abweichung liegt bei rund 2 % und sinkt mit zunehmender Energie ab. Auch hier ist der Faktor berechnet nach DIN 2016 durchgehend größer als nach Berechnung durch die Formel nach der aktuell gültigen DIN. Bei der neuen Formel für Flachkammern handelt es sich allerdings, anders als bei den Kompaktkammern, um eine Exponentialfunktion. Dadurch ist die Abweichung auch bei niedrigen Halbwerttiefen nicht so groß wie bei der Farmer-Kammer.

Wird der neu berechnete k_E -Faktor der Farmer-Kammer auf die Messergebnisse angewendet, so ergibt sich folgende absolute Dosis:

Tabelle 24: Dosisvergleich Farmer-Kammern

	Farmer 00		Farmer 01		Farmer 02	
	DIN 2008	DIN 2016	DIN 2008	DIN 2016	DIN 2008	DIN 2016
4 MeV	1,014	1,060	1,012	1,047	1,008	1,046
6 MeV	1,027	1,053	1,026	1,042	1,022	1,039
9 MeV	0,988	1,007	0,988	0,996	0,986	0,994
12 MeV	0,992	1,009	0,991	0,998	0,989	0,996
15 MeV	0,985	1,003	0,984	0,992	0,980	0,989

Die Absolutdosiswerte ermittelt nach dem DIN-Entwurf von 2016 sind durchwegs höher als die nach aktuell gültiger DIN ermittelten Dosiswerte. Für 4 MeV ist der Dosisanstieg mit bis zu 4,3 % am höchsten. Bei Farmer-Kammer 00 sind die Abweichung stets um 1 % höher als für die anderen beiden Farmer-Kammern. Für Kammer 00 reicht die Abweichung von 1,7 % für 12 MeV bis zu den angesprochenen 4,3 % für 4 MeV. Die Abweichungen der beiden anderen Kammern reicht von 0,7 % für 12 MeV bis zu 3,6 % für 4 MeV.

Der berechnete $k_{E,R}$ -Faktor der Farmer-Kammer ist auf Grund der Art der Bestimmung ebenfalls mit Fehlern behaftet. Es fließen die Ungenauigkeiten der Tiefendosismessungen wie auch der darauf aufbauenden Absolutdosimetrie mit ein. Insgesamt weicht der $k_{E,R}$ -Faktor maximal 4,8 % (4 MeV) von den Werten der aktuellen Bestimmung nach DIN 2008 ab. Für die restlichen Energien beträgt die Abweichung weniger als 2 %. Dies erscheint als eine akzeptable Abweichung, da auch der Vergleich des k_E -Faktors für die Flachkammer Abweichungen von bis zu 1,9 % liefert. Die große Abweichung bei 4 MeV lässt sich am ehesten mit der allgemeinen Problematik der 4 MeV erklären. Genannt wurde bereits der sehr steile Kurvenverlauf bei den Tiefendosiskurven der 4 MeV. Dazu kommt, dass der Elektronenstrahl bei 4 MeV weniger stabil ist als bei höheren Energien. Diese Eigenschaften erschweren eine präzise Dosimetrie mit dieser Elektronenenergie.

Nach Anwendung aller Korrekturfaktoren, auch des neu ermittelten $k_{E,R}$ -Faktors, ergibt sich eine maximale Abweichung innerhalb der Farmer-Kammern von 1,4 %.

Dieser Unterschied ist zwischen Kammer 00 und den anderen beiden Kammern bereits in den unkorrigierten Werten der Absolutdosimetrie zu sehen und am ehesten durch nicht ausreichendes stabilisierendes Bestrahlen nach Polaritätswechsel zu erklären. Da die Kammern ansonsten kaum Abweichungen voneinander zeigen, wird weiterhin eine hohe Stabilität angenommen.

5 Zusammenfassung

In dieser Arbeit wurde die Auswirkung der Bezugspunktverschiebung [19, 20, 21, 22, 30, 31, 32, 36] des DIN-Entwurfes 6800-2 2016 bei Elektronenstrahlung, sowie die Durchführbarkeit der Elektronen-Absolutdosimetrie mit Farmer-Kammern untersucht. Des Weiteren wurde der $k_{E,R}$ -Faktor für Farmerkammern bestimmt. Verwendet wurden vier Flachkammern unterschiedlicher Bauart (Roos-Kammer, Markus-Kammer, Advanced-Markus-Kammer der Firma PTW; PPC40-Kammer der Firma IBA) und drei Farmer-Kammer gleicher Bauart (PTW). Die Messungen wurden mit Elektronenenergien von 4 MeV bis 15 MeV durchgeführt.

In den aufgenommenen Tiefendosiskurven ist die Bezugspunktverschiebung (Δz) deutlich zu sehen. Die Kurven sind je nach Verschiebung parallel nach links ($+\Delta z$) oder rechts ($-\Delta z$) versetzt. Entsprechend verkürzt oder verlängert sich das Eintrittsfenster. Die sich dadurch veränderten Werte für die Halbwertiefen der Ionendosis wirken sich wiederum auf die für die Absolutdosimetrie benötigten Referenziefen z_{ref} aus. Diese Änderung der Messtiefe wird allerdings durch die neuen Formeln zur Berechnung der Halbwertiefe der Wasser-Energiedosis nahezu egalisiert. Die neuen Berechnungsvorschriften für den Korrektionsfaktor zur Berücksichtigung des Einflusses der Strahlungsqualität der Elektronenstrahlung hingegen haben größere Auswirkungen auf die Dosiswerte. Somit ergeben sich Dosisunterschiede von bis zu 4,5 %.

Auffallend ist die hohe Abweichung der mit der Advanced-Markus-Kammer gemessenen Dosis. Diese lässt sich zum aktuellen Zeitpunkt nicht erklären, ist aber am ehesten mit dem Detektor-Kalibrierfaktor in Verbindung zu bringen.

Der $k_{E,R}$ -Faktor der Farmer-Kammern wurde durch einen Dosisvergleich mit der Roos-Kammer ermittelt. Der Mittelwert der Dosis aller drei Farmer-Kammern pro Energie wurde mit der Dosis der Roos-Kammer verglichen, der Unterschied als $k_{E,R}$ -Faktor bestimmt. Dieser weicht um maximal 4,8 % von den Werten der k_E -Faktor-Berechnung nach der aktuell gültigen DIN ab.

Zusätzlich wurde das Verhalten der Farmer-Kammer bei der Absolutdosimetrie mit Elektronenstrahlung betrachtet. Hierbei wurde eine hohe Stabilität sowohl in den Tiefendosiskurven als auch in der Absolutdosimetrie deutlich, sodass die Farmer-Kammer der Firma PTW als für die Absolutdosimetrie mit Elektronenstrahlung < 10 MeV geeignet eingestuft wird. Nach Anwendung des neu ermittelten $k_{E,R}$ -Faktors liegt der Unterschied bei maximal 2,4 % zu den nach aktuell gültiger DIN ermittelten Werten. Ausnahme bilden die Messungen der 4 MeV. Hier liegen die Abweichungen bei bis zu 4 %. Da diese mit der Ermittlung des $k_{E,R}$ -Faktors zusammenhängen können, ist die Anwendung von Farmer-Kammern in der Absolutdosimetrie von Elektronenstrahlung für niedrige Elektronenenergien nicht auszuschließen.

Da der Einfluss des $k_{E,R}$ -Faktors sehr groß ist, gibt es in anderen Institutionen bereits Bestrebungen, die neuen Werte des $k_{E,R}$ -Faktors mit Hilfe von Monte-Carlo-Simulationen zu verifizieren.

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Linearbeschleuniger Clinac DHX der Firma Varian [VAR]	11
Abbildung 2: 20 x 20 cm Elektronentubus	12
Abbildung 3: MP3-M Wasserphantomsystem PTW Freiburg [PTWDa]	13
Abbildung 4: TANDEM-Elektrometer mit TBA Control Unit	14
Abbildung 5: UNIDOSwebline PTW Freiburg [PTWDb]	15
Abbildung 6: Dosimeter Dose 2 IBA [IBAc]	15
Abbildung 7: Ionisationskammer Typ 34001 (Maße in mm) (PTWb; PTWdC]	17
Abbildung 8: Ionisationskammer Typ 23343 (Maße in mm) [PTWc]	18
Abbildung 9: Ionisationskammer Typ 34045 (Maße in mm) [PTWd]	19
Abbildung 10: Ionisationskammer Typ 30013 (Maße in mm)	20
Abbildung 11: Flachkammer PPC40 IBA	20
Abbildung 12: TRUFIX pointing device mit cone point	21
Abbildung 13: Messaufbau für Tiefendosiskurven	22
Abbildung 14: Tiefendosiskurven der Roos-Kammer bei 4 MeV	34
Abbildung 15: Tiefendosiskurven der PPC40-Kammer bei 4 MeV	35
Abbildung 16: Tiefendosiskurven der Markus-Kammer bei 15 MeV	36
Abbildung 17: Tiefendosiskurven der Farmer-Kammer bei 4 MeV	37
Abbildung 18: Tiefendosiskurven der Farmer-Kammer bei 12 MeV	38
Abbildung 19: Tiefendosiskurven Farmer-Kammer bei 9 MeV	42
Abbildung 20: Absolutdosimetrie Flachkammern 4 MeV	47
Abbildung 21: Absolutdosimetrie Flachkammern 6 MeV	47
Abbildung 22: Absolutdosimetrie Flachkammern 9 MeV	48
Abbildung 23: Absolutdosimetrie Flachkammern 12 MeV	48
Abbildung 24: Absolutdosimetrie Flachkammern 15 MeV	48
Abbildung 25: Absolutdosimetrie Farmer-Kammern 4 MeV	50
Abbildung 26: Absolutdosimetrie Farmer-Kammern 6 MeV	50
Abbildung 27: Absolutdosimetrie Farmer-Kammern 9 MeV	51
Abbildung 28: Absolutdosimetrie Farmer-Kammern 12 MeV	51
Abbildung 29: Absolutdosimetrie Farmer-Kammern 15 MeV	51

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Bezugspunktverschiebung nach DIN6800-2 (2106)	22
Tabelle 2: Werte der Parameter A, B und C zur Berechnung von $k_{E,R}$	28
Tabelle 3: Werte der Konstanten für die Berechnung von sw , $a\Delta z$, R_{50}	30
Tabelle 4: Korrektionsfaktoren Roos-Kammer nach DIN 2008	31
Tabelle 5: Korrektionsfaktoren Roos-Kammer nach DIN 2016	32
Tabelle 6: R_{50} Wasserenergiedosis der Roos-Kammer (in cm)	39
Tabelle 7: R_{50} Wasserenergiedosis der PPC40-Kammer (in cm)	39
Tabelle 8: R_{50} Wasserenergiedosis der Markus-Kammer (in cm)	40
Tabelle 9: R_{50} Wasserenergiedosis der Advanced-Markus-Kammer (in cm)	40
Tabelle 10: R_{50} Wasserenergiedosis der Farmer-Kammer 00 (in cm)	41
Tabelle 11: R_{50} Wasserenergiedosis der Farmer-Kammer 01 (in cm)	41
Tabelle 12: R_{50} Wasserenergiedosis der Farmer-Kammer 02 (in cm)	42
Tabelle 13: Absolutdosimetrie Roos-Kammer	43
Tabelle 14: Absolutdosimetrie PPC40-Kammer	44
Tabelle 15: Absolutdosimetrie Markus-Kammer (+300V, DIN 2008)	44
Tabelle 16: Absolutdosimetrie Adv.-Markus-Kammer (+300V, DIN 2008)	44
Tabelle 17: Absolutdosimetrie Farmer-Kammer 00	45
Tabelle 18: Absolutdosimetrie Farmer-Kammer 01	45
Tabelle 19: Absolutdosimetrie Farmer-Kammer 02	45
Tabelle 20: Berechnung des Korrektionsfaktor $k_{E,R}$	52
Tabelle 21: Abweichung des Korrektionsfaktors k_E für Farmer-Kammern	52
Tabelle 22: Koeffizienten A, B und C des $k_{E,R}$ -Faktors der Farmer-Kammern	53
Tabelle 23: Abweichung des Korrektionsfaktors k_E für die Roos-Kammer	53
Tabelle 24: Dosisvergleich Farmer-Kammern	54

Literaturverzeichnis

- [ABCH⁺99] Almond, P. R.; Biggs, P. J.; Coursey, B. M.; Hanson, W. F.; Huq, M. S.; Nath, R.; Rogers, D. W. (1999): AAPM's TG-51 protocol for clinical reference dosimetry of high-energy photon and electron beams. In: *Medical physics* 26 (9), S. 1847–1870. DOI: 10.1118/1.598691
- [Ara08] Araki, F. (2008): Monte Carlo calculations of correction factors for plane-parallel ionization chambers in clinical electron dosimetry. In: *Medical physics* 35 (9), S. 4033–4040. DOI: 10.1118/1.2968102.
- [CDBS02] Christ, G.; Dohm, S.; Bruggmoser, G.; Schüle, E. (2002): The use of plane-parallel chambers in electron dosimetry without any cross-calibration. In: *Physics in medicine and biology* 47 (9), N121-6. DOI: 10.1088/0031-9155/47/9/402
- [CAKC⁺18] Chun, M.; An, H. J.; Kang, S.-H.; Cho, J. D.; Park, J. M.; Kim, J. (2018): Use of Cylindrical Chambers as Substitutes for Parallel-Plate Chambers in Low-Energy Electron Dosimetry. In: *Prog Med Phys* 29 (1), S. 16. DOI: 10.14316/pmp.2018.29.1.16
- [DIN08a] DIN 6800-2, März 2008: Dosismessverfahren nach der Sondenmethode für Photonen- und Elektronenstrahlung - Teil 2: Dosimetrie hochenergetischer Photonen- und Elektronenstrahlung mit Ionisationskammern
- [DIN16] DIN 6800-2 Entwurf, März 2016: Dosismessverfahren nach der Sondenmethode für Photonen- und Elektronenstrahlung - Teil 2: Dosimetrie hochenergetischer Photonen- und Elektronenstrahlung mit Ionisationskammern
- [DIN13] DIN 6847-5, Oktober 2013: Medizinische Elektronenbeschleuniger-Anlagen - Teil 5: Konstanzprüfung von Kennmerkmalen
- [DIN12] DIN 6847-6, September 2012: Medizinische Elektronenbeschleuniger-Anlagen - Teil6: Elektronische Bildempfänger (EPID) – Konstanzprüfung
- [DIN04] DIN 6875-1, Januar 2004: Spezielle Bestrahlungseinrichtungen - Teil 1: Perkutane stereotaktische Bestrahlung, Kennmerkmale und besondere PrüfmethodF201en
- [DIN08b] DIN 6875-2, November 2008: Spezielle Bestrahlungseinrichtungen - Teil 2: Perkutane stereotaktische Bestrahlung - Konstanzprüfungen

- [DIN08c] DIN 6875-3, März 2008: Spezielle Bestrahlungseinrichtungen - Teil 3: Fluenzmodulierte Strahlentherapie - Kennmerkmale, Prüfmethoden und Regeln für den klinischen Einsatz
- [DIN11] DIN 6875-4, Oktober 2011: Spezielle Bestrahlungseinrichtungen - Teil 4: Fluenzmodulierte Strahlentherapie – Konstanzprüfungen
- [IBAAa] IBA Dosimetry: Gebrauchsanweisung PPC40-Kammer
- [IBABa] IBA Dosimetry: Gebrauchsanweisung Dose 2
- [IBACa] IBA Dosimetry: Dose 2; <https://www.iba-dosimetry.com/product/dose-2/>, zuletzt geprüft am 21.10.2019
- [Kaw06a] Kawrakow, I. (2006): On the effective point of measurement in megavoltage photon beams. In: *Medical physics* 33 (6), S. 1829–1839. DOI: 10.1118/1.2201147
- [KK07] Krauss, A.; Kapsch, R.-P. (2007): Calorimetric determination of kQ factors for NE 2561 and NE 2571 ionization chambers in 5 cm x 5 cm and 10 cm x 10 cm radiotherapy beams of 8 MV and 16 MV photons. In: *Physics in medicine and biology* 52 (20), S. 6243–6259. DOI: 10.1088/0031-9155/52/20/011
- [LGMC⁺10] Lacroix, F.; Guillot, M.; McEwen, M.; Cojocar, C.; Gingras, L.; Beddar, A. S.; Beaulieu, L. (2010): Extraction of depth-dependent perturbation factors for parallel-plate chambers in electron beams using a plastic scintillation detector. In: *Medical physics* 37 (8), S. 4331–4342. DOI: 10.1118/1.3463383
- [LHK12a] Legrand, C.; Hartmann, G. H.; Karger, C. P. (2012): Experimental determination of the effective point of measurement and the displacement correction factor for cylindrical ionization chambers in a 6 MV photon beam. In: *Physics in medicine and biology* 57 (21), S. 6869–6880. DOI: 10.1088/0031-9155/57/21/6869
- [LHK12b] Legrand, C.; Hartmann, G. H.; Karger, C. P. (2012): Experimental determination of the effective point of measurement for cylindrical ionization chambers in ⁶⁰Co gamma radiation. In: *Physics in medicine and biology* 57 (11), S. 3463–3475. DOI: 10.1088/0031-9155/57/11/3463
- [LHP11] Looe, H. K.; Harder, D.; Poppe, B. (2011): Experimental determination of the effective point of measurement for various detectors used in photon and electron beam dosimetry. In: *Physics in medicine and biology* 56 (14), S. 4267–4290. DOI: 10.1088/0031-9155/56/14/005
- [LCHP12] Looe, Hui Khee; Chofor, Ndimofor; Harder, Dietrich; Poppe, Björn (2012): The EPOM shift of cylindrical ionization chambers-a status report

- [MKR08] McEwen, M. R.; Kawrakow, I.; Ross, C. K. (2008): The effective point of measurement of ionization chambers and the build-up anomaly in MV x-ray beams. In: *Medical physics* 35 (3), S. 950–958. DOI: 10.1118/1.2839329
- [MWD01] McEwen, M. R.; Williams, A. J.; Du Sautoy, A. R. (2001): Determination of absorbed dose calibration factors for therapy level electron beam ionization chambers. In: *Physics in medicine and biology* 46 (3), S. 741–755. DOI: 10.1088/0031-9155/46/3/310
- [MCDK⁺17] Muir, B.; Culberson, W.; Davis, S.; Kim, G.-Y.; Huang, Y.; Lee, S.-W. et al. (2017): Insight gained from responses to surveys on reference dosimetry practices. In: *Journal of applied clinical medical physics* 18 (3), S. 182–190. DOI: 10.1002/acm2.12081
- [MM17] Muir, B.; McEwen, M. R. (2017): Technical Note: On the use of cylindrical ionization chambers for electron beam reference dosimetry. In: *Medical physics* 44 (12), S. 6641–6646. DOI: 10.1002/mp.12582
- [PCPC⁺15] Park, Kwangwoo; Choi, Wonhoon; Park, Sungho; Choi, Jin Hwa; Park, Suk Won; Bak, Jino (2015): Determination of Correction Factors for Small Field Based on Measurement and Numerical Calculation using Cylindrical Ionization Chambers. Online verfügbar unter <http://arxiv.org/pdf/1503.04883v1>
- [PBHH⁺00] Pedro, A.; Burns, D.T.; Hohlfeld, K.; Huq, M. S.; Kanai, T.; Laitano, F.; Smyth, V.; Vynckier, S. (2000): Absorbed dose determination in External Beam Radiotherapy. An International code of Practice for Dosimetry based on Standards of Absorbed Dose to Water. Hg. v. International Atomic Energy Agency
- [PTWa] PTW Freiburg: Long-term stability of PTW Farmer Type Ionization Chambers
- [PTWb] PTW Freiburg: Gebrauchsanweisung Roos-Kammer
- [PTWc] PTW Freiburg: Gebrauchsanweisung Markus-Kammer
- [PTWd] PTW Freiburg: Gebrauchsanweisung Advanced-Markus-Kammer
- [PTWe] PTW Freiburg: Gebrauchsanweisung Farmer-Kammer
- [PTWf] PTW Freiburg: Gebrauchsanweisung MP3-M Wasserphantom
- [PTWg] PTW Freiburg: Gebrauchsanweisung TANDEM
- [PTWh] PTW Freiburg: Gebrauchsanweisung Unidos
- [PTWDa] PTW Dosimetry: MP3 Water Phantom System; <https://www.ptwdo-simetry.com/en/products/mp3-m-water-phantom-system/>, zuletzt geprüft am 21.10.2019

- [PTWDb] PTW Dosimetry: UNIDOS webline; <https://www.ptwdosimetry.com/en/products/unidos-webline/>, zuletzt geprüft am 21.10.2019
- [PTWDc] PTW Dosimetry: Roos Electron Chamber; <https://www.ptwdosimetry.com/en/products/roos-electron-chamber/>, zuletzt geprüft am 21.10.2019
- [SABD⁸⁴] Svensson, H.; Almond, P.; Brahme, A.; Dutreix, A.; Leetz, H. K. (1984): Report 35. In: *Journal of the International Commission on Radiation Units and Measurements* os18 (2), NP-NP. DOI: 10.1093/jicru/os18.2. Report 35
- [THM10] Tessier, F.; Hooten, B. D.; McEwen, M. R. (2010): Zero-shift thimble ionization chamber. In: *Medical physics* 37 (3), S. 1161–1163. DOI: 10.1118/1.3314072
- [Tes10] Tessier, F. (2010): Accurate dose distributions: The Implications of new effective point of measurement values for thimble ionization chambers
- [TK10] Tessier, F.; Kawrakow, I. (2010): Effective point of measurement of thimble ion chambers in megavoltage photon beams. In: *Medical physics* 37 (1), S. 96–107. DOI: 10.1118/1.3266750
- [VAR] Clinac IX System; <https://www.varian.com/de/oncology/products/treatment-delivery/clinac-ix-system>, zuletzt geprüft am 21.10.2019
- [VCZ13] von Voigts-Rhetz, P.; Czarnecki, D.; Zink, K. (2013): Effective point of measurement for parallel plate and cylindrical ion chambers in megavoltage electron beams. In: *Z. Med. Phys.* 24 (2014) S. 216–233 DOI: 10.1016/j.zemedi.2013.12.001
- [WR09a] Wang, L. L. W.; Rogers, D. W. O. (2009): Study of the effective point of measurement for ion chambers in electron beams by Monte Carlo simulation. In: *Medical physics* 36 (6), S. 2034–2042. DOI: 10.1118/1.3121490
- [WR09b] Wang, L. L. W.; Rogers, D. W. O. (2009): The replacement correction factors for cylindrical chambers in high-energy photon beams. In: *Physics in medicine and biology* 54 (6), S. 1609–1620. DOI: 10.1088/0031-9155/54/6/014
- [WR10] Wang, L. L. W.; Rogers, D. W. O. (2010): Replacement correction factors for plane-parallel ion chambers in electron beams. In: *Medical physics* 37 (2), S. 461–465. DOI: 10.1118/1.3276735

- [ZCLV⁺14] Zink, K.; Czarnecki, D.; Looe, H. K.; Voigts-Rhetz, P. von; Harder, D. (2014): Monte Carlo study of the depth-dependent fluence perturbation in parallel-plate ionization chambers in electron beams. In: *Medical physics* 41 (11), S. 111707. DOI: 10.1118/1.4897389
- [ZW08] Zink, K.; Wulff, J. (2008): Monte Carlo calculations of beam quality correction factors k_Q for electron dosimetry with a parallel-plate Roos chamber. In: *Physics in medicine and biology* 53 (6), S. 1595–1607. DOI: 10.1088/0031-9155/53/6/006
- [ZW09] Zink, K.; Wulff, J. (2009): Positioning of a plane-parallel ionization chamber in clinical electron beams and the impact on perturbation factors. In: *Physics in medicine and biology* 54 (8), S. 2421–2435. DOI: 10.1088/0031-9155/54/8/011
- [ZW12] Zink, K.; Wulff, J. (2012): Beam quality corrections for parallel-plate ion chambers in electron reference dosimetry. In: *Physics in medicine and biology* 57 (7), S. 1831–1854

Anhang

A.1 Technische Daten Messkammern

A.1.1 Roos-Kammer



Roos® Chamber Type 34001

Waterproof plane parallel chamber for absolute dosimetry in high-energy electron and proton beams

Features

- ▶ Perturbation-free, minimized polarity effect
- ▶ Waterproof, wide guard ring design
- ▶ Sensitive volume 0.35 cm³, vented to air
- ▶ Radioactive check device (option)

The 34001 Roos chamber is the golden standard for absolute dose measurements in high-energy electron beams. Modern dosimetry protocols refer to the chamber's design and provide dosimetric correction factors. Its waterproof design allows the chamber to be used in water or in solid state phantoms. The Roos chamber is also well suited for the measurement of high-energy photon depth dose curves. The chamber can be used for dose measurements of proton beams.

Specification

Type of product	vented plane parallel ionization chamber acc. IEC 60731
Application	absolute dosimetry in high-energy electron and proton beams
Measuring quantity	absorbed dose to water
Reference radiation quality	⁶⁰ Co
Nominal sensitive volume	0.35 cm ³
Design	waterproof, vented
Reference point	in chamber center, 1.12 mm below surface
Direction of incidence	perpendicular to chamber plane, see label 'Focus'
Nominal response	12 nC/Gy
Long-term stability	≤ 0.5 % per year
Chamber voltage	200 V nominal ± 400 V maximal
Polarity effect	< 0.5 %
Directional response in water	≤ ± 0.1 % for chamber tilting ≤ ± 10°
Leakage current	≤ ± 4 fA
Cable leakage	≤ 1 pC/(Gy·cm)

Materials and measures:

Entrance window	1.01 mm PMMA, 1.19 g/cm ³ 0.02 mm graphite, 0.82 g/cm ³ 0.1 mm varnish, 1.19 g/cm ³
-----------------	----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------

Total window area density	132 mg/cm ²
---------------------------	------------------------

Water-equivalent window thickness	1.3 mm
-----------------------------------	--------

Sensitive volume	radius 7.8 mm depth 2 mm
------------------	-----------------------------

Guard ring width	4 mm
------------------	------

Ion collection efficiency at nominal voltage:

Ion collection time	125 μs
---------------------	--------

Max. dose rate for ≥ 99.5 % saturation	5.2 Gy/s
≥ 99.0 % saturation	10.4 Gy/s

Max. dose per pulse for ≥ 99.5 % saturation	0.46 mGy
≥ 99.0 % saturation	0.93 mGy

Useful ranges:

Chamber voltage	± (50 ... 300) V
-----------------	------------------

Radiation quality	(2 ... 45) MeV electrons ⁶⁰ Co ... 25 MV photons (50 ... 270) MeV protons
-------------------	--------------------------------------------------------------------------------------------

Field size	(4 x 4) cm ² ... (40 x 40) cm ²
------------	-------------------------------------------------------

Temperature	(10 ... 40) °C (50 ... 104) °F
-------------	-----------------------------------

Humidity	(10 ... 80) %, max 20 g/m ³
----------	----------------------------------------

Air pressure	(700 ... 1060) hPa
--------------	--------------------

Ordering Information

TN34001 Roos electron chamber 0.35 cm³, connecting system BNT

TW34001 Roos electron chamber 0.35 cm³, connecting system TNC

TM34001 Roos electron chamber 0.35 cm³, connecting system M

Options

T48010 Radioactive check device ⁹⁰Sr

T48004 Chamber holding device for check device

A.1.2 PPC40-Kammer

3.1. Materials

Part	Material	Characteristic
Entrance window (polarizing electrode)	PMMA (coated with graphite)	1.19 g/cm ³
Back wall (collecting electrode)	PMMA (coated with graphite)	1.19 g/cm ³
Chamber stem	PEEK	1.32 g/cm ³
Build-up cap	PMMA	1.19 g/cm ³

3.2. Dimensions

Outer dimensions

Part	Dimension
Chamber outer diameter	44.0 mm
Chamber body height	10.0 mm
Stem diameter	10.0 mm
Stem length	50.0 mm

Inner dimensions

Part	Dimension
Sensitive volume (nominal)	0.40 cm ³
Cylinder height	2.0 mm
Entrance window (polarizing electrode) diameter	20.0 mm
Entrance window thickness	1.0 mm
Diameter of collecting electrode	16.0 mm
Guard ring diameter	17.8 mm
Guard ring width	3.4 mm

3.3. Operational characteristics

Item	Characteristic
Polarizing voltage	± 300 V (max. ± 500 V)
Typical leakage current	5 fA
Recommended pre-irradiation	5 Gy
Typical sensitivity	11 nC/Gy
Guard potential	± 300 V (max. ± 500 V)
Temperature range	15 to 35 °C
Relative humidity range	20 % to 80 %

3.4. Performance characteristics

Performance characteristics at standard conditions

Characteristics	Limit
Leakage Current ¹	± 0.5 %
Long-term stability	± 0.5 % per year

¹ Percentage of the ionization current produced at minimum dose rate

Performance characteristics for effects of influence quantities

Influence Quantity	Rated Range	Limit
Post-irradiation leakage	5 s after irradiation	± 0.2 % ^a
Minimum dose rate	0.006 Gy/min	
Maximum absorbed dose per pulse	0.2 cGy	> 99 % ^b
Stray radiation effect	parts within 50 cm cable length	< ± 0.5 %
Polarity	Co-60 at +300 V and -300 V	< ± 0.2 %
	6 MeV electron beam at +300 V and -300 V	< ± 0.4 %
Atmospheric pressure change	± 5 % to ± 10 %	< 5 s

^a leakage current as percentage of current during previous 10 min irradiation

^b ion collection efficiency

3.5. Beam quality

Beam quality	Nominal range	Rated range according to reference	Limit of variation (k_a)	Reference
Electrons	2 to 20 MeV	R_{50} 1.0 to 8.0 cm	0.969 to 0.893	PMB ^c
Photons	Co-60 to 25 MV	$TPR_{20,10}$ 0.50 to 0.80	1.000 to 0.945	IAEA ^d
Protons	40 to 230 MeV	R_{res} 0.25 to 30.0 cm	1.02 to 1.00	TRS 398 ^e

^c Josep Sempau et al 2004 Phys. Med. Biol. 49 4427.

^d Ralf-Peter Kapsch et al 2010, IAEA International Dosimetry Symposium

^e calculated acc. to IAEA TRS 398, Appendix B

A.1.3 Markus-Kammer



Features

- ▶ Thin entrance window and waterproof protection cap
- ▶ Small-sized for high spatial resolution
- ▶ Sensitive volume 0.055 cm³, vented to air
- ▶ Radioactive check device (option)

The 23343 Markus chamber is manufactured in the original famous Markus design. Absorbed dose to water can be measured by applying correction factors for perturbation effects as published in pertinent dosimetry protocols. The thin entrance window allows measurements in solid state phantoms up to the surface. The protection cap makes the chamber waterproof for measurements in water phantoms.

Specification

Type of product	vented plane parallel ionization chamber
Application	absolute dosimetry in high-energy electron beams
Measuring quantity	absorbed dose to water
Reference radiation quality	⁶⁰ Co
Nominal sensitive volume	0.055 cm ³
Design	waterproof with protection cap, vented
Reference point	in chamber center on entrance foil, or 1.3 mm below surface of protection cap
Direction of incidence	perpendicular to chamber plane
Nominal response	2 nC/Gy
Long-term stability	≤ 1 % per year
Chamber voltage	300 V nominal ± 400 V maximal
Polarity effect	≤ 1 % for electrons ≥ 9 MeV
Directional response in water	≤ ± 0.1 % for chamber tilting ≤ ± 10°
Leakage current	≤ ± 4 fA
Cable leakage	≤ 3.5 pC/(Gy·cm)

Markus® Chamber Type 23343

Classic plane parallel chamber for absolute dosimetry in high-energy electron beams

Materials and measures:

Entrance foil	0.03 mm PE (polyethylene CH ₂), 2.76 mg/cm ²
Protection cap	0.87 mm PMMA, 1.19 g/cm ³ , 0.4 mm air
Total window area density	106 mg/cm ² , 1.3 mm (protection cap included)
Water-equivalent window thickness	1.06 mm (protection cap included)
Sensitive volume	radius 2.65 mm depth 2 mm
Guard ring width	< 0.2 mm

Ion collection efficiency at nominal voltage:

Ion collection time	90 μs
Max. dose rate for ≥ 99.5 % saturation	12 Gy/s
≥ 99.0 % saturation	24 Gy/s
Max. dose per pulse for ≥ 99.5 % saturation	0.7 mGy
≥ 99.0 % saturation	1.4 mGy

Useful ranges:

Chamber voltage	± (100 ... 300) V
Radiation quality	(2 ... 45) MeV electrons (50 ... 270) MeV protons
Field size	(3 x 3) cm ² ... (40 x 40) cm ²
Temperature	(10 ... 40) °C (50 ... 104) °F
Humidity	(10 ... 80) %, max 20 g/m ³
Air pressure	(700 ... 1060) hPa

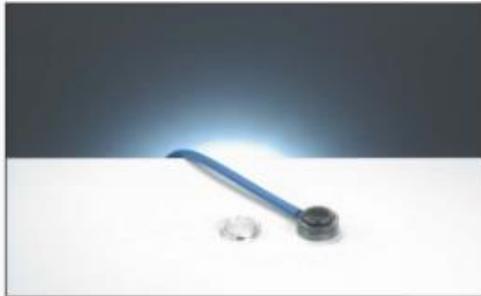
Ordering Information

TN23343 Markus electron chamber 0.055 cm³,
connecting system BNT
TW23343 Markus electron chamber 0.055 cm³,
connecting system TNC
TM23343 Markus electron chamber 0.055 cm³,
connecting system M

Options

T48010 Radioactive check device ⁹⁰Sr
T23343/11 Chamber holding device for check device

A.1.4 Advanced-Markus-Kammer



Advanced Markus® Chamber Type 34045

Perturbation-free version of the famous classic Markus chamber for absolute dosimetry in high-energy electron beams

Features

- ▶ Perturbation-free electron chamber
- ▶ Thin entrance window and waterproof protection cap
- ▶ Small-sized for high spatial resolution
- ▶ Sensitive volume 0.02 cm³, vented to air
- ▶ Radioactive check device (option)

The 34045 Advanced Markus chamber is the successor of the well-known classic Markus electron chamber, equipped with a wide guard ring for perturbation-free measurements. The thin entrance window allows measurements in solid state phantoms up to the surface. The protection cap makes the chamber waterproof for measurements in water phantoms.

Specification

Type of product	vented plane parallel ionization chamber
Application	absolute dosimetry in high-energy electron beams
Measuring quantity	absorbed dose to water
Reference radiation quality	⁶⁰ Co
Nominal sensitive volume	0.02 cm ³
Design	waterproof with protection cap, vented
Reference point	in chamber center on entrance foil, or 1.3 mm below surface of protection cap
Direction of incidence	perpendicular to chamber plane
Nominal response	0.67 nC/Gy
Long-term stability	≤ 1 % per year
Chamber voltage	300 V nominal ± 400 V maximal
Polarity effect	≤ 1 % for electrons ≥ 9 MeV
Directional response in water	≤ ± 0.1 % for chamber tilting ≤ ± 10°
Leakage current	≤ ± 4 fA
Cable leakage	≤ 1 pC/(Gy·cm)

Materials and measures:

Entrance foil	0.03 mm PE (polyethylene CH ₂), 2.76 mg/cm ²
Protection cap	0.87 mm PMMA, 1.19 g/cm ² , 0.4 mm air
Total window area density	106 mg/cm ² , 1.3 mm (protection cap included)
Water-equivalent window thickness	1.06 mm (protection cap included)
Sensitive volume	radius 2.5 mm depth 1 mm
Guard ring width	2 mm

Ion collection efficiency at nominal voltage:

Ion collection time	22 μs
Max. dose rate for ≥ 99.5 % saturation	187 Gy/s
≥ 99.0 % saturation	375 Gy/s
Max. dose per pulse for ≥ 99.5 % saturation	2.78 mGy
≥ 99.0 % saturation	5.56 mGy

Useful ranges:

Chamber voltage	± (50 ... 300) V
Radiation quality	(2 ... 45) MeV electrons (50 ... 270) MeV protons
Field size	(3 x 3) cm ² ... (40 x 40) cm ²
Temperature	(10 ... 40) °C (50 ... 104) °F
Humidity	(10 ... 80) %, max 20 g/m ³
Air pressure	(700 ... 1060) hPa

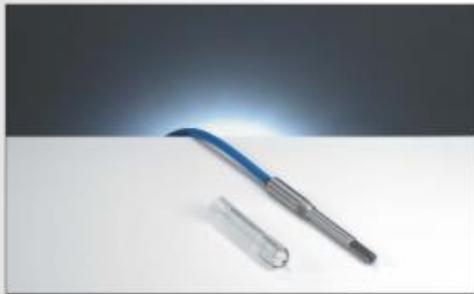
Ordering Information

TN34045 Advanced Markus electron chamber, 0.02 cm³, connecting system BNT
 TW34045 Advanced Markus electron chamber, 0.02 cm³, connecting system TNC
 TM34045 Advanced Markus electron chamber, 0.02 cm³, connecting system M

Options

T48010 Radioactive check device ⁹⁰Sr
 T23343/11 Chamber holding device for check device

A.1.5 Farmer-Kammer



Features

- ▶ Waterproof, fully guarded chamber
- ▶ Sensitive volume 0.6 cm³, vented to air
- ▶ Acrylic wall, graphited
- ▶ Aluminum central electrode
- ▶ Radioactive check device (option)

The 30013 Farmer chamber is the standard ionization chamber for absolute dose measurements in radiation therapy. Correction factors needed to determine absorbed dose to water or air kerma are published in the pertinent dosimetry protocols. Its waterproof design allows the chamber to be used in water or in solid state phantoms. The acrylic chamber wall ensures the ruggedness of the chamber.

Specification

Type of product	vented cylindrical ionization chamber acc. IEC 60731
Application	absolute therapy dosimetry in water, solid state phantoms and air
Measuring quantities	absorbed dose to water, air kerma, exposure
Reference radiation quality	⁶⁰ Co
Nominal sensitive volume	0.6 cm ³
Design	waterproof, vented, fully guarded
Reference point	on chamber axis, 13 mm from chamber tip
Direction of incidence	radial
Nominal response	20 nC/Gy
Long-term stability	≤ 0.5 % per year
Chamber voltage	400 V nominal ± 500 V maximal
Polarity effect at ⁶⁰ Co	< 0.5 %
Photon energy response	≤ ± 2 % (70 kV ... 280 kV) ≤ ± 4 % (200 kV ... ⁶⁰ Co)
Directional response in water	≤ ± 0.5 % for rotation around the chamber axis and for tilting of the axis up to ± 5°
Leakage current	≤ ± 4 fA
Cable leakage	≤ 1 pC/(Gy·cm)

Farmer® Chamber Type 30013

Waterproof therapy chamber for absolute dosimetry in high-energy photon, electron and proton beams

Materials and measures:

Wall of sensitive volume	0.335 mm PMMA, 1.19 g/cm ³ 0.09 mm graphite, 1.85 g/cm ³
Total wall area density	56.5 mg/cm ²
Dimension of sensitive volume	radius 3.05 mm length 23.0 mm
Central electrode	Al 99.98, diameter 1.15 mm
Build-up cap	PMMA, thickness 4.55 mm

Ion collection efficiency at nominal voltage:

Ion collection time	140 µs
Max. dose rate for ≥ 99.5 % saturation	5 Gy/s
≥ 99.0 % saturation	10 Gy/s
Max. dose per pulse for ≥ 99.5 % saturation	0.46 mGy
≥ 99.0 % saturation	0.91 mGy

Useful ranges:

Chamber voltage	± (100 ... 400) V
Radiation quality	30 kV ... 50 MV photons (10 ... 45) MeV electrons (50 ... 270) MeV protons
Field size	(5 x 5) cm ² ... (40 x 40) cm ²
Temperature	(10 ... 40) °C (50 ... 104) °F
Humidity	(10 ... 80) %, max 20 g/m ³
Air pressure	(700 ... 1060) hPa

Ordering Information

- TN30013 Farmer type chamber 0.6 cm³, waterproof, connecting system BNT
- TW30013 Farmer type chamber 0.6 cm³, waterproof, connecting system TNC
- TM30013 Farmer type chamber 0.6 cm³, waterproof, connecting system M

Options

- T48012 Radioactive check device ⁹⁰Sr
- T48002.3.003 Chamber holding device for check device

A.1.6 MP3-M System

Technical Specifications

3D Water Tank

Scanning range:	500 mm (horiz.) x 500 mm (horiz.) x 408 mm (vert.)
Wall thickness:	20 mm
Material:	PMMA
Outer tank dimensions:	636 mm (L) x 634 mm (W) x 523 mm (H)
Max. water quantity:	171 l
Weight:	50 kg

Driving Mechanism

Type:	Precision worm gear drive
Material:	Stainless steel
Motor:	Three stepper motors
Minimum step size:	0.1 mm
Maximum speed:	50 mm/s

Rotable Positioning Device

Travel:	± 10 mm in vertical and horizontal direction
Pivoting around vertical axis:	$\pm 1^\circ$
Swiveling to positions:	0° , $\pm 45^\circ$ and $\pm 90^\circ$

Control Unit

Power supply:	(100 ... 230) V / (50 ... 60) Hz
Dimensions:	326 mm (L) x 259 mm (W) x 115 mm (H)
Weight:	4 kg

Handheld Control Pendant

Display of detector position:	TFT display
Resolution:	0.1 mm
Connection:	Tank or Control Unit

SCANLIFT

Description:	Lift carriage with built-in water reservoir
Power supply:	Integrated wide-range (100 ... 240) VAC / (50 ... 60) Hz
Max. height above floor:	1233 mm (to platform), 1735 mm (to water surface)
Min. height above floor:	733 mm (to platform), 1235 mm (to water surface)
Moving range:	500 mm
Time for full lift:	45 s
Minimum step size:	< 1 mm
Pump:	Centrifugal pump with capacity of 35 l/min
Pumping/draining time:	5 min (filling), 7 min (draining)
Total dimensions:	1137 mm (L) x 784 mm (W) x 900 mm (H)
Ground clearance:	83 mm
Weight:	132 kg (without water)

TANDEM Dual-Channel Electrometer

Channels:	2
Resolution:	10 fA
Chamber voltage:	(0 ... ± 400) V, programmable in 50 V increments
Dynamic range:	5 pA ... 100 nA in three ranges
Time constant:	10 ms in all ranges
Non-linearity:	$\leq \pm 0.5$ % acc. to IEC 60731
Long-term stability:	$\leq \pm 0.5$ % p.a. acc. to IEC 60731
Reproducibility:	$\leq \pm 0.5$ % acc. to IEC 60731

Detectors

Field/reference detectors:	Semiflex vented cylindrical ionization chambers, waterproof, type 31010
Radiation quality:	100 kV ... 50 MV photons (10 ... 45) MeV electrons (50 ... 270) MeV protons
Volume:	0.125 cm ³
Field size:	(2 x 2) cm ² ... (40 x 40) cm ²

TRUFIX® Detector Positioning System

TRUFIX system:	Patented detector mounting and positioning system. Basic package (L981150) includes: base plate, pointing and holding devices for Semiflex, PinPoint 3D, Advanced Markus or Markus ionization chambers
----------------	--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------

A.1.7 UNIDOS (PTW)

Bezeichnung	Dosis- und Dosisleistungsmessgerät PTW-UNIDOS ^{webline} , Typ 10021 (M-Stecksystem), Typ 10022 (TNC-Stecksystem) und Typ 10023 (BNT-Stecksystem)
Hersteller	PTW-Freiburg
Verwendung	Gebrauchsdosimeter für Dosis- und Dosisleistungsmessungen – in der Strahlentherapie entsprechend IEC 60731 – in der Röntgendiagnostik entsprechend IEC 61674 – im Strahlenschutz für ortsfesten Betrieb in Innenräumen entsprechend IEC 60846 Ladungs- und Strommessgerät
Betriebsart	Dauerbetrieb
Elektrische Sicherheitsklasse	IEC 61010-1 (DIN EN 61010-1)
Schutzklasse	I
Überspannungskategorie	II
Verschmutzungsgrad	2
Elektromagnetische Verträglichkeit	für den Betrieb in einer elektromagnetischen Umgebung nach IEC 61326-1 geeignet
Messgrößen und Einheiten	Wasser-Energiedosis D_w (Gy), Wasser-Energiedosisleistung (Gy/s) Luftkerma K_A (Gy), Luftkermaleistung (Gy/min) Standardionendosis J_S (R), Standardionendosisleistung (R/s) Photonen-Äquivalentdosis H_x (Sv) Umgebungs-Äquivalentdosis $H^*(10)$ (Sv) Aktivität (Bq, Ci) Kenndosisleistung K_A ($Gy \cdot m^2/h$, $R \cdot m^2/h$) Dosislängenprodukt ($Gy \cdot m$, $R \cdot m$) Dosisflächenprodukt DFP ($Gy \cdot m^2$, $R \cdot m^2$)
Messarten	Dosis oder Ladung Dosisleistung oder Strom
Abtastrate bei Integration über Dosisleistung oder Strom	1 kHz
Max. Messzeit für Dosismessung	100 h
einstellbare Integrationszeit	(1 ... 9999) s
Hochspannung	(0 ... ± 400) V, einstellbar in 1 V Schritten
max. Abweichung der Hochspannung	$\leq \pm 1$ V
Genauigkeit des Verhältnisses zwischen zwei Hochspannungen	≤ 2 %
Begrenzung des Stroms aus der Hochspannungsquelle im Fehlerfall	Halbleiterschutz typ. 200 μA ; zusätzlich über Widerstand: max. 300 μA

Messbereiche	Siehe Tabelle 2, Abschnitt 12.1
Wiederholbarkeit *	$\leq \pm 0,25 \%$
Selbstablauf (Nullpunktwanderung in beiden Messarten) *	Messbereich LOW: $\leq \pm 1 \text{ fA}$ Messbereich MED: $\leq \pm 50 \text{ fA}$ Messbereich HIGH: $\leq \pm 5 \text{ pA}$
Nullabgleich	automatisch in 74 s
Linearitätsabweichung in beiden Messarten *	$\leq \pm 0,25 \%$
Langzeitstabilität *	$< \pm 0,1 \%$ pro Jahr
Einstellzeit *	$< 1,5 \text{ s}$
Umgebungsbedingungen für den Betrieb:	
Temperatur	(+ 10 ... + 40) °C
Relative Luftfeuchte	(20 ... 80) %, ohne Kondensation (max. 20 g/m ³ absolute Feuchte)
Luftdruck	(600 ... 1200) hPa
Umgebungsbedingungen für Transport und Lagerung:	
Temperatur	(- 20 ... + 60) °C
Relative Luftfeuchte	(10 ... 80) %, ohne Kondensation (max. 20 g/m ³ absolute Feuchte)
Luftdruck	(600 ... 1200) hPa
Bezugsbedingungen für:	
Temperatur	+ 20 °C
Relative Luftfeuchte	50 %
Streustrahlung	0 $\mu\text{Sv/h}$
Anzeige	4-stellig
Anlaufzeit	15 min
Abmessungen (H × B × T)	152 mm × 257 mm × 262 mm
Gewicht	5,9 kg
Lebensdauer des nichtflüchtigen Speichers	typisch 10 Jahre
Spannungsversorgung	(100 ... 230) V $\pm 15 \%$; (50 ... 60) Hz 6 Stück NiMH-Akkumulatoren (Baugröße AA) für netzunabhängigen Betrieb von ca. 2 h, PTW-Bestellnummer L389026
Leistungsaufnahme im Netzbetrieb	ca. 23 W
Exsikkator	PTW-Bestellnummer L137004
HV-Eingang für externe Hochspannungsquelle	$\pm 1000 \text{ V DC}$, schwebend (siehe Abschnitt 1.3, Seite 16)
Ethernetschnittstelle	IEEE 802, 10Mbit/s, TCP/IP-Protokoll

Einflussgröße	Nenngebrauchsbereich der Einflussgröße	Geräteeigenschaft	Max. Änderung
Anlaufzeit	15 min ... 6 h	Ansprechvermögen	$\leq \pm 0,2 \%$
Messbereichswechsel	alle Messbereiche	Ansprechvermögen	$\leq \pm 0,2 \%$
Temperatur	(+ 10 ... + 40) °C	Ansprechvermögen Nullpunktwanderung	$\leq \pm 0,25 \%$ $\leq \pm 0,5 \%$
Relative Luftfeuchte	(20 ... 80) %, ohne Kondensation (max. 20 g/m ³ absolute Feuchte)	Ansprechvermögen Nullpunktwanderung	$\leq \pm 0,25 \%$ $\leq \pm 0,5 \%$
Streustrahlung	(0 ... 0,2) mSv/h	Nullpunktwanderung	$\leq \pm 1 \%$
Schwankung der Netzspannung	(- 15 ... + 10) % der Nennspannung	Ansprechvermögen	$\leq \pm 0,2 \%$
Akkubetrieb	Lebensdauer der Akkus	Ansprechvermögen	$\leq \pm 0,2 \%$
Elektromagnetische Verträglichkeit	nach IEC 61000-x	Ansprechvermögen	$\leq \pm 1 \%$
Stromrichtungsabhängigkeit	positive/negative Polarität	Ansprechvermögen	$\leq \pm 0,1 \%$

A.1.8 Dose 2 (IBA)

Rated Effective Range on Input Currents Per IEC 60731 for Reference Grade:	0.400 pA – 500.0 nA ($\pm 0.25\%$ of minimum effective scale reading)
Range Switching:	User selectable
Display Resolution: LOW: Rate	0.001 pA / 0.001 pC

mode/Charge mode HIGH: Rate mode/Charge mode	0.001 nA / 0.001 nC
Repeatability	$\pm 0.1\%$
Long Term Stability	$\pm 0.5\%$ over one year
Stabilization Time	$\pm 0.1\%$ of value at 1 hour for measurements taken at 15 minutes and 6 hours
Non-linearity	$\pm 0.25\%$
Zero Drift	Rate mode: $\pm 0.25\%$ of minimum effective scale reading (LOW/HIGH: $< \pm 0.001$ pA / $< \pm 0.001$ nA)
Zero Shift	Rate mode: $\pm 0.25\%$ of minimum effective scale reading (LOW/HIGH: $< \pm 0.001$ pA / $< \pm 0.001$ nA)
Charge Leakage Current	LOW/HIGH: $< \pm 0.001$ pA / $< \pm 0.001$ nA

Response Time	High range: < 2 seconds, Low range: < 12 seconds
Main Software Functions	Channel 1 Measurement, Channel 2 Measurement, Channel 1 & 2 Measurement,
Charge Collection Modes	Timed Mode - Selectable timer from 1 to 600 seconds in 1 second increments Continuous Mode (Manual Start/Stop) - Press Start to begin collection and Stop to end Trigger Mode – current exceeding pre-selected trigger values starts and stops collection
Count up/Count down Resolution	1 second (count up for Continuous Mode, count down for Timed Mode)
Trigger Levels for Charge Collection	Start value must be larger than stop value (set via Preferences interface)
Start	0.2 pA - 9.9 pA
Stop	0.1 pA - 9.8 pA
Operating Parameters:	
Temperature	15°C - 35°C
Relative Humidity	20% - 80% non-condensing
Pressure	650 mmHg to 770 mmHg
Storage Parameters:	
Temperature	-15 - 50 °C
Relative Humidity	10 - 95% non-condensing
Pressure	600 mmHg to 800 mmHg
Display	Color LCD TFT touch screen. VGA (640x480) resolution, 6.4" diagonal
Input	2 channels, TNC two lug triaxial connector
Bias Voltage	± VDC for the following: 0 to 1000 VDC in 1 VDC increments, 350 µA max

Zeroing	Zero via button push - Display indicates zeroing in progress
Output	RS232 (Default: Uni-directional 19,200 baud, 8 data bits, no parity, 1 stop bit; Bi-directional operation via user commands, tech note available upon request) (2) USB ports (Input devices only, keyboard or thumb drive – no mouse support) Ethernet (internal use only, not currently supported)
Chamber library calibration coefficients	Amp System factors: Nsk: $\mu\text{Gym}^2/(\text{h}^*\text{A})$ Nsk: $\text{Gym}^2/(\text{h}^*\text{A})$ Nx,sk: $\text{Rm}^2/(\text{h}^*\text{A})$ NA:GBq/A NA:Ci/A N D,W:mGy/(sec*A) NA:MBq/A NA:mCi/A Coulombs System Factors: Nk:Gy/C Nx:R/C NGas:Gy/C ND:Gy/C N D,W:Gy/C
Real-Time Clock	On board, for data validation and storage
Audio	On board speaker for audio feedback on start-up, button presses, operator alerts, etc.
Dimensions: Width Height Length	26.7 cm (10.5 in) 8.1 cm (3.2 in) 21.1 cm (8.3 in)
Weight	2.5 kg (5.45 lbs)
Mode of Operation	Continuous
Power Requirements	100-240 VAC, 0.5 A max, 50/60 Hz input to external power supply, 9 VDC, 1.7 A power supply output to electrometer input, Globtek®, Inc. power supply model GTM21089-1509-T3 or TRUMPower power supply model FRM015-S09-4 The use of any other power supply and using alternates other than the UL/CSA recognized power cord can degrade minimum safety. The proper replacements from IBA Dosimetry are required for compliance with the requirements of IEC 60601-1.

A.2 Korrektionsfaktoren der verwendeten Kammern

A2.1 PPC40-Kammer nach DIN 2008

		4E	6E	9E	12E	15E
Luftdichte k_p $k_p = (P_0 \cdot T) / (p \cdot T_0)$	P_0	101,325	101,325	101,325	101,325	101,325
	T_0	293,15	293,15	293,15	293,15	293,15
	p	96,1	96,1	96,1	96,1	96,1
	T	298,75	298,75	298,75	298,75	298,75

Korrektionsfaktor $k_p =$

1,0745	1,0745	1,0745	1,0745	1,0745
--------	--------	--------	--------	--------

Luftfeuchte k_h n.e.

unvollständige Sättigung k_s
(kammerabhängig)

γ [V]	0,07	0,07	0,07	0,07	+	0,07
σ [V / mGy]	1,54	1,54	1,54	1,54		1,54
D^P [mGy]	1,111	1,111	1,111	1,111		1,111
U [V]	300	300	300	300		300
ISZ [ms]	0,09	0,09	0,09	0,09		0,09

Korrektionsfaktor $k_s =$

1,0059	1,0059	1,0059	1,0059	1,0059
--------	--------	--------	--------	--------

Polarität der Kammeranspannung k_P

Korrektionsfaktor $k_P =$

1	1	1	1	1
---	---	---	---	---

andere Temperatureffekte k_T
n.e.

Strahlungsqualitätsindex k_E $k_E = k_E' \cdot k_E''$

$$k_E' = 1,106 - 0,1312 \cdot (R_{50})^{0,214}$$

$R_{50,ion}$	1,348	2,371	3,622	4,994	6,267
R_{50}	1,327	2,380	3,667	5,079	6,389

$k_E' =$

0,9666	0,9481	0,9327	0,9202	0,9109
--------	--------	--------	--------	--------

Allgemein: $k_E'' = \frac{(p_{vall} \cdot p_{cav} \cdot p_{cel} \cdot p_{\Delta})_{R50}}{(p_{vall} \cdot p_{cav} \cdot p_{cel} \cdot p_{\Delta})_{C_0}}$

bei Flachkammern: $k_E'' = \frac{(p_{vall} \cdot p_{\Delta})_{R50}}{(p_{vall} \cdot p_{cav} \cdot p_{\Delta})_{C_0}}$

aus Tabelle: $k_E'' =$

0,9810	0,9810	0,9810	0,9810	0,9810
--------	--------	--------	--------	--------

(kammerabhängig)

Korrektionsfaktor $k_E =$

0,9482	0,9300	0,9150	0,9027	0,8936
--------	--------	--------	--------	--------

Messung unter Nicht-Referenzbedingungen

z_{ref}	0,696	1,328	2,100	2,947	3,733
z	0,70	1,33	2,10	2,95	3,74
p	1,0025	1,0017	1,0003	0,9992	0,9988
k_{NF}	1,0001	1,0001	1,0000	1,0000	1,0001

	4E	6E	9E	12E	15E
Gesamt-Korrektionsfaktoren k_{tot}	1,025	1,005	0,989	0,976	0,966

A2.2 PPC40-Kammer nach DIN 2016

		4E	6E	9E	12E	15E
Luftdichte k_p $k_p = (P_0 \cdot T) / (p \cdot T_0)$	p_0	101,325	101,325	101,325	101,325	101,325
	T_0	293,15	293,15	293,15	293,15	293,15
	p	96,1	96,1	96,1	96,1	96,1
	T	298,75	298,75	298,75	298,75	298,75

Korrektionsfaktor $k_p =$ **1,0745** **1,0745** **1,0745** **1,0745** **1,0745**

Luftfeuchte k_h n.e

unvollständige Sättigung k_s

(kammerabhängig)

γ [V]	0,07	0,07	0,07	0,07	0,07
σ [V / mGy]	1,54	1,54	1,54	1,54	1,54
D^p [mGy]	1,111	1,111	1,111	1,111	1,111
U [V]	300	300	300	300	300
ISZ [ms]	0,09	0,09	0,09	0,09	0,09

Korrektionsfaktor $k_s =$ **1,0059** **1,0059** **1,0059** **1,0059** **1,0059**

Polarität der Kammeranspannung k_p

Korrektionsfaktor $k_p =$ **1** **1** **1** **1** **1**

Positionierung der Ionisationskammer k_r **0,9976057**

Strahlungsqualitätsindex k_{EM} $k_E = k_{E,R} \cdot k_{NR,E}$

$R_{50,ion}$	1,416	2,410	3,669	5,039	6,300
R_{50}	1,424	2,432	3,715	5,116	6,412

$k_{E,R} =$ **0,9662** **0,9461** **0,9277** **0,9139** **0,9052**

Messung unter Nicht-Referenzbedingungen

z_{Ref}	0,754	1,359	2,129	2,970	3,747
z	0,76	1,36	2,11	2,97	3,73
p	1,0025	1,0016	1,0002	0,9992	0,9988
k_{NR}	1,0002	1,0000	0,9995	1,0000	0,9997

	4E	6E	9E	12E	15E
Gesamt-Korrektionsfaktoren $k_i =$	1,042	1,020	1,000	0,985	0,976

A2.3 Markus Kammer nach DIN 2008

		4E	6E	9E	12E	15E
Luftdichte k_p $k_p = (P_0 * T) / (p * T_0)$	P_0	101,325	101,325	101,325	101,325	101,325
	T_0	293,15	293,15	293,15	293,15	293,15
	p	96,3	96,3	96,3	96,3	96,3
	T	298,25	298,25	298,25	298,25	298,25

Korrektionsfaktor $k_p =$ **1,0705 1,0705 1,0705 1,0705 1,0705**

Luftfeuchte $k_{n.e.}$

unvollständige Sättigung k_s

(kammerabhängig)

γ [V]	0,32	0,32	0,32	0,32	0,32
σ [V / mGy]	1,99	1,99	1,99	1,99	1,99
D^p [mGy]	1,111	1,111	1,111	1,111	1,111
U [V]	300	300	300	300	300
ISZ [ms]	0,09	0,09	0,09	0,09	0,09

Korrektionsfaktor $k_s =$ **1,0084 1,0084 1,0084 1,0084 1,0084**

Polarität der Kammerspannung k_p

Korrektionsfaktor $k_p =$ **1,0066 1,0102 1,009 1,0052 1,0007**

andere Temperatureffekte k_T

n.e.

Strahlungsqualitätsindex k_E $k_E = k_E' * k_E''$

$$k_E' = 1,106 - 0,1312 * (R_{50})^{0,214}$$

$R_{50,ion}$	1,310	2,307	3,554	4,922	6,179
R_{50}	1,288	2,314	3,597	5,005	6,298
k_E'	0,9675	0,9490	0,9335	0,9208	0,9115

Allgemein: $k_E'' = \frac{(P_{wall} * P_{cav} * P_{col} * P_{\Delta})_{R50}}{(P_{wall} * P_{cav} * P_{col} * P_{\Delta})_{Co}}$

bei Flachkammern: $k_E'' = \frac{(P_{wall} * P_{\Delta})_{R50}}{(P_{wall} * P_{cav} * P_{\Delta})_{Co}}$

aus Tabelle:	$k_E'' =$	0,9563	0,9625	0,9682	0,9726	0,9754
Formel 17 (S33)	$pcav =$	0,9739	0,9802	0,9860	0,9904	0,9932

Korrektionsfaktor $k_E =$ **0,9253 0,9135 0,9038 0,8956 0,8890**

Messung unter Nicht-Referenzbedingungen

z_{ref}	0,673	1,288	2,058	2,903	3,679
z	0,67	1,29	2,06	2,90	3,68
p	1,0025	1,0018	1,0003	0,9995	0,9988
k_{NR}	0,9999	1,0001	1,0000	1,0002	1,0001

	4E	6E	9E	12E	15E
Gesamt-Korrektionsfaktoren $k_c =$	1,005	0,996	0,984	0,972	0,960

A2.4 Markus Kammer nach DIN 2016

		4E	6E	9E	12E	15E
Luftdichte k_p $k_p = (P_0 \cdot T) / (p \cdot T_0)$	p_0	101,325	101,325	101,325	101,325	101,325
	T_0	293,15	293,15	293,15	293,15	293,15
	p	96,3	96,3	96,3	96,3	96,3
	T	298,25	298,25	298,25	298,25	298,25

Korrektionsfaktor $k_p =$ **1,0705 1,0705 1,0705 1,0705 1,0705**

Luftfeuchte k_h n.e

unvollständige Sättigung k_s
(kammerabhängig)

γ [V]	0,06	0,06	0,06	0,06	0,06
σ [V / mGy]	1,69	1,69	1,69	1,69	1,69
D^p [mGy]	1,111	1,111	1,111	1,111	1,111
U [V]	200	200	200	200	200
ISZ [ms]	0,13	0,13	0,13	0,13	0,13

Korrektionsfaktor $k_s =$ **1,0097 1,0097 1,0097 1,0097 1,0097**

Polarität der Kammerspannung k_p

Korrektionsfaktor $k_p =$ **1,0055 1,0111 1,0108 1,0101 1,0064**

Positionierung der Ionisationskammer k_r **0,9982032**

andere Temperatureffekte k_T

Strahlungsqualitätsindex k_E $k_E = k_{E,R} \cdot k_{NR,E}$

$R_{SO,ion} =$	1,339	2,336	3,577	4,952	6,210
$R_{SO} =$	1,346	2,357	3,621	5,027	6,319

$k_{E,R} =$ **0,9680 0,9474 0,9288 0,9146 0,9057**

Messung unter Nicht-Referenzbedingungen

$z_{Ref} =$	0,708	1,314	2,072	2,916	3,691
$z =$	0,71	1,31	2,07	2,92	3,69
$p =$	1,0025	1,0017	1,0003	0,9992	0,9988
$k_{NR} =$	1,0001	0,9998	0,9999	1,0000	1,0000

	4E	6E	9E	12E	15E
Gesamt-Korrektionsfaktoren $k_i =$	1,050	1,033	1,013	0,997	0,983

A2.5 Adv. Markus Kammer nach DIN 2008

		4E	6E	9E	12E	15E
Luftdichte k_p	p_0	101,325	101,325	101,325	101,325	101,325
	T_0	293,15	293,15	293,15	293,15	293,15
	p	96,3	96,3	96,3	96,3	96,3
	T	298,15	298,15	298,15	298,15	298,15

Korrektionsfaktor $k_p =$

1,0701	1,0701	1,0701	1,0701	1,0701
--------	--------	--------	--------	--------

Luftfeuchte k_h n.e.

unvollständige Sättigung k_s

γ [V]	0,43	0,43	0,43	0,43	0,43
σ [V / mGy]	0,49	0,49	0,49	0,49	0,49
D^P [mGy]	1,111	1,111	1,111	1,111	1,111
U [V]	300	300	300	300	300
ISZ [ms]	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02

Korrektionsfaktor $k_s =$

1,0032	1,0032	1,0032	1,0032	1,0032
--------	--------	--------	--------	--------

Polarität der Kammer Spannung k_p

Korrektionsfaktor $k_p =$

1,0103	1,0112	1,0052	1,0023	1,0004
--------	--------	--------	--------	--------

andere Temperatureffekte k_T

n.e.

Strahlungsqualitätsindex k_E $k_E = k_E^+ \cdot k_E^-$

$$k_E^+ = 1,106 - 0,1312 \cdot (R_{SO})^{0,214}$$

$R_{SO,ion}$	1,350	2,352	3,590	4,951	6,182
R_{SO}	1,329	2,360	3,634	5,035	6,301

$k_E^+ =$

0,9666	0,9483	0,9331	0,9206	0,9115
--------	--------	--------	--------	--------

Allgemein:
$$k_E^{**} = \frac{(P_{wall} \cdot P_{cav} \cdot P_{cal} \cdot P_{\Delta})_{R50}}{(P_{wall} \cdot P_{cav} \cdot P_{cal} \cdot P_{\Delta})_{Co}}$$

bei Flachkammern:
$$k_E^{**} = \frac{(P_{wall} \cdot P_{\Delta})_{R50}}{(P_{wall} \cdot P_{cav} \cdot P_{\Delta})_{Co}}$$

$k_E^{**} =$

0,9850	0,9850	0,9850	0,9850	0,9850
--------	--------	--------	--------	--------

Korrektionsfaktor $k_E =$

0,9521	0,9341	0,9191	0,9068	0,8978
--------	--------	--------	--------	--------

Messung unter Nicht-Referenzbedingungen

z_{Ref}	0,697	1,316	2,080	2,921	3,681
z	0,70	1,31	2,08	2,92	3,68
p	1,0025	1,0017	1,0003	0,9993	0,9988
k_{NP}	1,0001	0,9998	1,0000	1,0000	1,0000

Gesamt-Korrektionsfaktoren $k_E =$

1,033	1,014	0,992	0,976	0,964
-------	-------	-------	-------	-------

A2.6 Adv. Markus Kammer nach DIN 2016

		4E	6E	9E	12E	15E
Luftdichte k_p	p_0	101,325	101,325	101,325	101,325	101,325
$k_p = (P_0 \cdot T) / (p \cdot T_0)$	T_0	293,15	293,15	293,15	293,15	293,15
	p	96,3	96,3	96,3	96,3	96,3
	T	298,15	298,15	298,15	298,15	298,15

Korrektionsfaktor $k_p =$

1,0701	1,0701	1,0701	1,0701	1,0701
--------	--------	--------	--------	--------

Luftfeuchte k_h n.e

unvollständige Sättigung k_s

γ [V]	0,43	0,43	0,43	0,43	0,43
σ [V / mGy]	0,49	0,49	0,49	0,49	0,49
D^p [mGy]	1,111	1,111	1,111	1,111	1,111
U [V]	300	300	300	300	300
ISZ [ms]	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02

Korrektionsfaktor $k_s =$

1,0032	1,0032	1,0032	1,0032	1,0032
--------	--------	--------	--------	--------

Polarität der Kammerspannung k_p

Korrektionsfaktor $k_p =$

1,0119	1,0106	1,0052	1,0019	1,0006
--------	--------	--------	--------	--------

Positionierung der Ionisationskammer k_r

1

andere Temperatureffekte k_T

Strahlungsqualitätsindex k_E

$R_{50,ion} =$	1,350	2,352	3,590	4,951	6,182
$R_{50} =$	1,357	2,374	3,634	5,026	6,290
$k_{E,R} =$	0,9677	0,9471	0,9286	0,9146	0,9059

Messung unter Nicht-Referenzbedingungen

$z_{Ref} =$	0,714	1,324	2,080	2,916	3,674
$z =$	0,71	1,32	2,08	2,92	3,67
$p =$	1,0025	1,0017	1,0003	0,9993	0,9988
$k_{NR} =$	0,9998	0,9999	1,0000	1,0001	0,9999

Gesamt-Korrektionsfaktoren $k_i =$

1,051	1,027	1,002	0,984	0,973
-------	-------	-------	-------	-------

A2.7 Farmer-Kammer 00 nach DIN 2008

		4E	6E	9E	12E	15E
Luftdichte k_p $k_p = (P_0 * T) / (p * T_0)$	P_0	101,325	101,325	101,325	101,325	101,325
	T_0	293,15	293,15	293,15	293,15	293,15
	p	96,3	96,3	96,3	96,3	96,3
	T	298,15	298,15	298,15	298,15	298,15

Korrektionsfaktor $k_p =$ **1,0701 1,0701 1,0701 1,0701 1,0701**

Luftfeuchte k_h n.e. ▼ +

unvollständige Sättigung k_s
(kammerabhängig) ▼

γ [V]	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01
σ [V / mGy]	3,44	3,44	3,44	3,44	3,44
D^p [mGy]	1,111	1,111	1,111	1,111	1,111
U [V]	400	400	400	400	400
ISZ [ms]	0,13	0,13	0,13	0,13	0,13

Korrektionsfaktor $k_s =$ **1,0096 1,0096 1,0096 1,0096 1,0096**

Polarität der Kammeranspannung k_p ▼

Korrektionsfaktor $k_p =$ **1,0025 1,0019 1,0013 1,0012 1,0009**

andere Temperatureffekte k_T
n.e. ▼

Positionierung der Kompaktkammer k_r **1,0093**

r: Innenradius Messvolumen aus S. 15 L
(3,1mm)

Strahlungsqualitätsindex k_E $k_E = k_E' * k_E''$

$$k_E' = 1,106 - 0,1312 * (R_{50})^{0,214}$$

$R_{50,ion}$	1,299	2,292	3,546	4,926	6,159
R_{50}	1,277	2,298	3,589	5,009	6,278

$k_E' =$ **0,9678 0,9492 0,9335 0,9208 0,9116**

Allgemein: $k_E'' = \frac{(P_{wall} * P_{cav} * P_{cel} * P_{\Delta})_{R50}}{(P_{wall} * P_{cav} * P_{cel} * P_{\Delta})_{Co}}$

bei Flachkammern: $k_E'' = \frac{(P_{wall} * P_{\Delta})_{R50}}{(P_{wall} * P_{cav} * P_{\Delta})_{Co}}$

$k_E'' =$ **0,9484 0,9565 0,9650 0,9726 0,9781**
 $p_{cav} =$ 0,9446662 0,9526745 0,9611533 0,9687394 0,974255

Formel 15 (S.28)

(kammerabhängig)

Korrektionsfaktor $k_E =$ **0,9179 0,9079 0,9009 0,8956 0,8917**

Messung unter Nicht-Referenzbedingungen

z_{Ref}	0,666	1,279	2,053	2,905	3,667
z	0,67	1,28	2,05	2,91	3,67
p	1,0025	1,0018	1,0003	0,9993	0,9988
k_{NR}	1,0002	1,0000	0,9999	1,0001	1,0000

A2.8 Farmer-Kammer 00 nach DIN 2016

		4E	6E	9E	12E	15E
Luftdichte k_p	p_0	101,325	101,325	101,325	101,325	101,325
$k_p = (P_0 * T) / (p * T_0)$	T_0	293,15	293,15	293,15	293,15	293,15
	p	96,3	96,3	96,3	96,3	96,3
	T	298,15	298,15	298,15	298,15	298,15

Korrektionsfaktor $k_p =$ **1,0701 1,0701 1,0701 1,0701 1,0701**

Luftfeuchte k_h n.e

unvollständige Sättigung k_s

(kammerabhängig)

PTW 34001 Roos:

γ [V]	0	0	0	0	0
σ [V / mGy]	3,44	3,44	3,44	3,44	3,44
D^P [mGy]	1,111	1,111	1,111	1,111	1,111
U [V]	200	200	200	200	200
ISZ [ms]	0,13	0,13	0,13	0,13	0,13

Korrektionsfaktor $k_s =$ **1,0191 1,0191 1,0191 1,0191 1,0191**

Polarität der Kammeranspannung k_p

Korrektionsfaktor $k_p =$ **1,002 1,0019 1,0008 1,0009 1,001**

Positionierung der Ionisationskammer k_r **1,0092345**

andere Temperatureffekte k_T

Strahlungsqualitätsindex k_E $k_E = k_{E,R} * k_{NR,E}$

$R_{50,ion} =$	1,161	2,149	3,427	4,807	6,012
$R_{50} =$	1,166	2,167	3,468	4,878	6,115

$k_{z,r} =$ **1,0000 1,0000 1,0000 1,0000 1,0000**

Messung unter Nicht-Referenzbedingungen

$z_{ref} =$	0,599	1,200	1,981	2,827	3,569
$z =$	0,600	1,20	1,98	2,83	3,57
$p =$	1,0025	1,0020	1,0005	0,9993	0,9988
$k_{NR} =$	1,0001	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000

		4E	6E	9E	12E	15E
Gesamt-Korrektionsfaktoren $k_i =$		1,103	1,103	1,102	1,102	1,102

A2.9 Farmer-Kammer 01 nach DIN 2008

		4E	6E	9E	12E	15E
Luftdichte k_p $k_p = (P_0 \cdot T) / (p \cdot T_0)$	P_0	101,325	101,325	101,325	101,325	101,325
	T_0	293,15	293,15	293,15	293,15	293,15
	p	96,3	96,3	96,3	96,3	96,3
	T	298,05	298,05	298,05	298,05	298,05

Korrektionsfaktor $k_p =$

1,0698	1,0698	1,0698	1,0698	1,0698
--------	--------	--------	--------	--------

Luftfeuchte k_h n.e.

unvollständige Sättigung k_s

(kammerabhängig)

PTW 34001 Roos:

γ [V]	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01
σ [V / mGy]	3,44	3,44	3,44	3,44	3,44
D^P [mGy]	1,111	1,111	1,111	1,111	1,111
U [V]	400	400	400	400	400
ISZ [ms]	0,13	0,13	0,13	0,13	0,13

Korrektionsfaktor $k_s =$

1,0096	1,0096	1,0096	1,0096	1,0096
--------	--------	--------	--------	--------

Polarität der Kammeranspannung k_P

Korrektionsfaktor $k_P =$

1,0016	1,0011	1,0004	1,0007	1,0009
--------	--------	--------	--------	--------

andere Temperatureffekte k_T

n.e.

Positionierung der Kompaktkammer k_r

1,0093

Strahlungsqualitätsindex k_E $k_E = k_{E'} \cdot k_{E''}$

$$k_{E'} = 1,106 - 0,1312 \cdot (R_{50})^{0,214}$$

$R_{50,ion} =$

1,308	2,297	3,549	4,928	6,156
-------	-------	-------	-------	-------

$R_{50} =$

1,286	2,304	3,592	5,011	6,275
-------	-------	-------	-------	-------

$k_{E'} =$

0,9675	0,9491	0,9335	0,9208	0,9116
--------	--------	--------	--------	--------

Allgemein: $k_{E''} = \frac{(P_{wall} \cdot P_{cav} \cdot P_{cor} \cdot P_{\Delta})_{R50}}{(P_{wall} \cdot P_{cav} \cdot P_{cor} \cdot P_{\Delta})_{Co}}$

bei Flachkammern: $k_{E''} = \frac{(P_{wall} \cdot P_{\Delta})_{R50}}{(P_{wall} \cdot P_{cor} \cdot P_{\Delta})_{Co}}$

aus Tabelle: $k_{E''} =$

0,9485	0,9565	0,9650	0,9726	0,9781
--------	--------	--------	--------	--------

 Formel 15 (S.28) $p_{cav} =$

0,9447446	0,9527118	0,9611717	0,9687492	0,9742429
-----------	-----------	-----------	-----------	-----------

(kammerabhängig)

Korrektionsfaktor $k_E =$

0,9177	0,9079	0,9008	0,8956	0,8917
--------	--------	--------	--------	--------

Messung unter Nicht-Referenzbedingungen

Z_{ref}	0,672	1,282	2,055	2,907	3,665
z	0,67	1,28	2,06	2,91	3,67
p	1,0025	1,0018	1,0003	0,9993	0,9988
k_{NF}	0,9999	0,9999	1,0001	1,0001	1,0001

Gesamt-Korrektionsfaktoren $k_{tot} =$

1,002	0,991	0,982	0,977	0,973
-------	-------	-------	-------	-------

A2.10 Farmer-Kammer 01 nach DIN 2016

		4E	6E	9E	12E	15E
Luftdichte k_p $k_p = (P_0 * T) / (p * T_0)$	P_0	101,325	101,325	101,325	101,325	101,325
	T_0	293,15	293,15	293,15	293,15	293,15
	p	96,3	96,3	96,3	96,3	96,3
	T	298,05	298,05	298,05	298,05	298,05

Korrektionsfaktor $k_p =$ **1,0698** **1,0698** **1,0698** **1,0698** **1,0698**

Luftfeuchte k_h n.e

unvollständige Sättigung k_s
(kammerabhängig)

γ [V]	0	0	0	0	0
σ [V / mGy]	3,44	3,44	3,44	3,44	3,44
D^P [mGy]	1,111	1,111	1,111	1,111	1,111
U [V]	400	400	400	400	400
ISZ [ms]	0,13	0,13	0,13	0,13	0,13

Korrektionsfaktor $k_s =$ **1,0096** **1,0096** **1,0096** **1,0096** **1,0096**

Polarität der Kammer Spannung k_p

Korrektionsfaktor $k_p =$ **1,0008** **1,0011** **1,0014** **1,0014** **1,001**

Positionierung der Ionisationskammer **1,0092345**

andere Temperatureffekte k_T

Strahlungsqualitätsindex k_E $k_E = k_{E,R} * k_{NR,E}$

$R_{SO,ion}$	1,160	2,140	3,415	4,789	6,007
R_{SO}	1,165	2,158	3,456	4,860	6,110
$k_{t,r}$	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000

Messung unter Nicht-Referenzbedingungen

z_{Ref}	0,599	1,195	1,973	2,816	3,566
z	0,60	1,20	1,97	2,82	3,57
p	1,0025	1,0020	1,0005	0,9993	0,9989
k_{NR}	1,0001	1,0002	0,9999	1,0000	1,0001

		4E	6E	9E	12E	15E
Gesamt-Korrektionsfaktoren $k_f =$		1,091	1,091	1,091	1,092	1,091

A2.11 Farmer-Kammer 02 nach DIN 2008

		4E	6E	9E	12E	15E
Luftdichte k_p	p_0	101,325	101,325	101,325	101,325	101,325
$k_p = (P_0 * T) / (p * T_0)$	T_0	293,15	293,15	293,15	293,15	293,15
	p	96,3	96,3	96,3	96,3	96,3
	T	297,25	297,25	297,25	297,25	297,25

Korrektionsfaktor $k_p =$ **1,0669 1,0669 1,0669 1,0669 1,0669**

Luftfeuchte k_h n.e.

unvollständige Sättigung k_s

(kammerabhängig)

PTW 34001 Roos:

γ [V]	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01
σ [V / mGy]	3,44	3,44	3,44	3,44	3,44
D^p [mGy]	1,111	1,111	1,111	1,111	1,111
U [V]	400	400	400	400	400
ISZ [ms]	0,13	0,13	0,13	0,13	0,13

Korrektionsfaktor $k_s =$ **1,0096 1,0096 1,0096 1,0096 1,0096**

Polarität der Kammeranspannung k_p

Korrektionsfaktor $k_p =$ **1,0035 1,0015 1,0008 1,0011 1,0011**

andere Temperatureffekte k_T

n.e.

Positionierung der Kompaktkammer k_r **1,0093**

Strahlungsqualitätsindex k_E $k_E = k_E * k_{E'}$

$$k_{E'} = 1,106 - 0,1312 * (R_{50})^{0,214}$$

$R_{50,ion}$	1,322	2,315	3,564	4,934	6,182
R_{50}	1,300	2,322	3,607	5,017	6,301

$k_{E'} =$ **0,9672 0,9489 0,9333 0,9207 0,9115**

Allgemein:

$$k_{E''} = \frac{(P_{wall} * P_{cav} * P_{cel} * P_{\Delta})_{R50}}{(P_{wall} * P_{cav} * P_{cel} * P_{\Delta})_{Co}}$$

bei Flachkammern:

$$k_{E''} = \frac{(P_{wall} * P_{\Delta})_{R50}}{(P_{wall} * P_{cav} * P_{\Delta})_{Co}}$$

aus Tabelle: $k_{E''} =$ **0,9486 0,9567 0,9651 0,9726 0,9782**
 Formel 15 (S.28) $p_{cav} =$ 0,9448662 0,9528456 0,9612632 0,9687787 0,9743481

(kammerabhängig)

Korrektionsfaktor $k_E =$ **0,9175 0,9077 0,9008 0,8955 0,8916**

Messung unter Nicht-Referenzbedingungen

z_{Ref}	0,680	1,293	2,064	2,910	3,681
z	0,68	1,29	2,06	2,91	3,68
p	1,0025	1,0018	1,0003	0,9992	0,9988
k_{NRF}	1,0000	0,9999	0,9999	0,9999	1,0000

Gesamt-Korrektionsfaktoren $k_c =$ **1,001 0,988 0,980 0,975 0,970**

A2.12 Farmer-Kammer 02 nach DIN 2016

		4E	6E	9E	12E	15E
Luftdichte k_p	p_0	101,325	101,325	101,325	101,325	101,325
$k_p = (P_0 * T) / (p * T_0)$	T_0	293,15	293,15	293,15	293,15	293,15
	p	96,3	96,3	96,3	96,3	96,3
	T	297,25	297,25	297,25	297,25	297,25

Korrektionsfaktor $k_p =$ **1,0669** **1,0669** **1,0669** **1,0669** **1,0669**

Luftfeuchte k_h n.e

unvollständige Sättigung k_s
(kammerabhängig)

γ [V]	0	0	0	0	0
σ [V / mGy]	3,44	3,44	3,44	3,44	3,44
D^P [mGy]	1,111	1,111	1,111	1,111	1,111
U [V]	400	400	400	400	400
ISZ [ms]	0,13	0,13	0,13	0,13	0,13

Korrektionsfaktor $k_s =$ **1,0096** **1,0096** **1,0096** **1,0096** **1,0096**

Polarität der Kammer Spannung k_p

Korrektionsfaktor $k_p =$ **1,0007** **1,0022** **1,0018** **1,0014** **1,0014**

Positionierung der Ionisationskammer k_r **1,0092345**

andere Temperatureffekte k_T

Strahlungsqualitätsindex k_{EM} $k_E = k_{E,R} * k_{NR,E}$

$R_{SO,ion}$	1,168	2,159	3,416	4,794	6,030
R_{SO}	1,173	2,177	3,457	4,865	6,134
$k_{E,R}$	1	1	1	1	1

Messung unter Nicht-Referenzbedingungen

z_{Ref}	0,604	1,206	1,974	2,819	3,580
z	0,60	1,21	1,97	2,82	3,58
p	1,0024	1,0019	1,0005	0,9993	0,9989
k_{NR}	0,9998	1,0001	0,9999	1,0000	1,0000

	4E	6E	9E	12E	15E
Gesamt-Korrektionsfaktoren $k_f =$	1,088	1,090	1,089	1,089	1,089