

Elektronenstrahlung

BM6 DOSIMETRIE

24. November 2017

Dozent: Prof. Dr. Gunter Christ

Medizinische Strahlenwissenschaften



Antonia Schlageter

ZIEL DES PRAKTIKUMS

- Aufnahme von Tiefendosisverläufen für Elektronenstrahlung
- Vergleich der Tiefendosisverläufe für verschiedene Elektroneneintrittsenergien, Messsonden und Tubusse

ELEKTRONENSTRAHLUNG

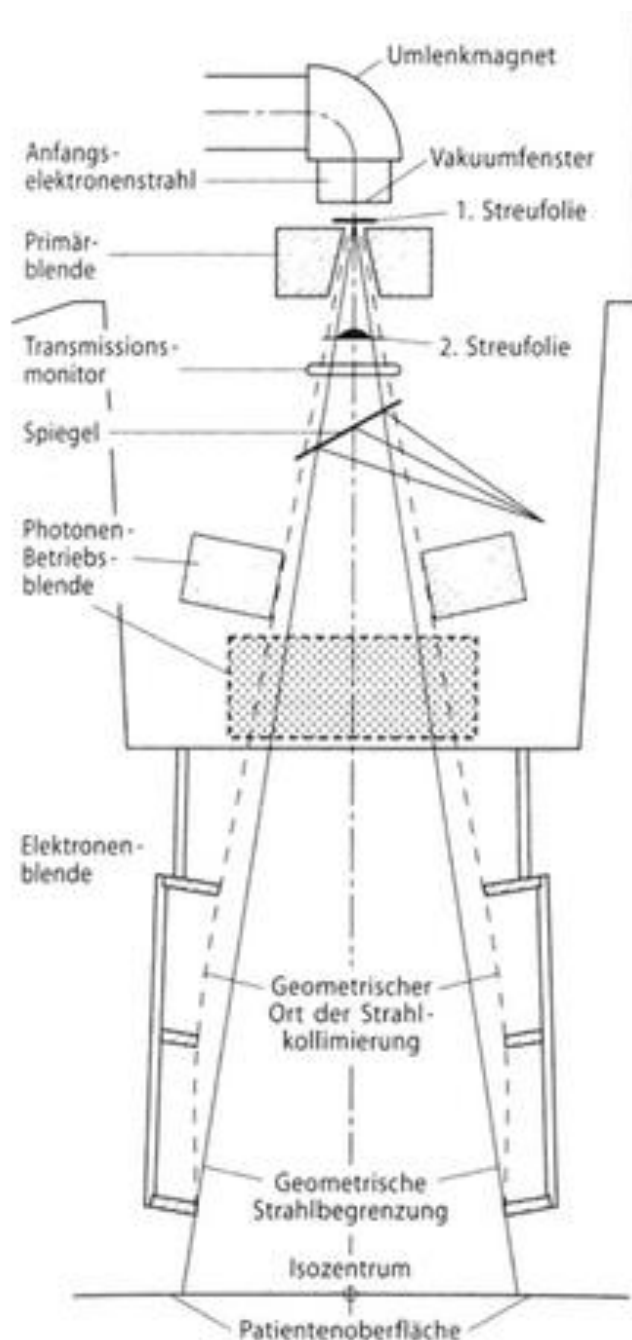


Abbildung 1 Strahler und Kollimatorsystem eines medizinischen Elektronenbeschleunigers in der Stellung "Elektronenstrahlung" (Hödel; Schäfer) S.52

Abbildung 1 veranschaulicht den Weg des Elektronenaustritts aus dem Strahlenrohr bis hin zum Auftreffen des Strahlenbündels auf die Patientenoberfläche. Die Streufoleiten den Elektronenstrahl auf und erzeugen eine homogene Dosisverteilung.

Elektronenstrahlung – WARUM?

Elektronenstrahlung eignet sich besonders gut für den Einsatz zur Behandlung von oberflächlichen Zielvolumina, die sich vor Risikoorganen befinden. Vorteil der Elektronenstrahlung ist ihre geringe und abzuschätzende Eindringtiefe ins Gewebe und der vollständige Energieverlust der Elektronen in einer gewissen Tiefe, sodass diese dann keine weitere Dosis deponieren können. Außerdem fällt die Dosis nach Erreichen des Dosismaximums bei einer Elektronenbestrahlung vergleichsweise schnell ab, sodass Gewebe hinter dem Tumor besser geschont wird und die Erzeugung der Dosis auf ein bestimmtes Zielvolumen beschränkt wird.

In Deutschland werden schätzungsweise 5% der Bestrahlungen mit einem Elektronenfeld durchgeführt. In Privatpraxen hingegen findet diese Behandlungsform kaum eine

Anwendung, weil dies mit zusätzlichem Aufwand einhergeht.

Kenngrößen der Elektronenstrahlung

Beim Durchgang durch das Strahlenaustrittsfenster des Beschleunigers und die verschiedenen Materialschichten bis zum Eintritt in das zu bestrahlende Medium vermindert sich die mittlere Energie der Elektronen und ihre Energieverteilung verbreitert sich. Dies setzt sich bis zum Erreichen der maximalen Reichweite der Elektronen fort. Die Form des Elektronenenergiespektrums ist tiefenabhängig – mit zu zunehmender Tiefe im Medium verringert sich die mittlere Energie und das Spektrum verbreitert sich.

Einfluss des Spektrums auf den Tiefendosisverlauf:

- Breite Energiespektren erhöhen die Oberflächendosis
- Breite Energiespektren verschieben das Dosismaximum an die Oberfläche des Mediums
- Breite Energiespektren sorgen für eine Verflachung des Tiefendosisverlaufs nach dem Dosismaximum

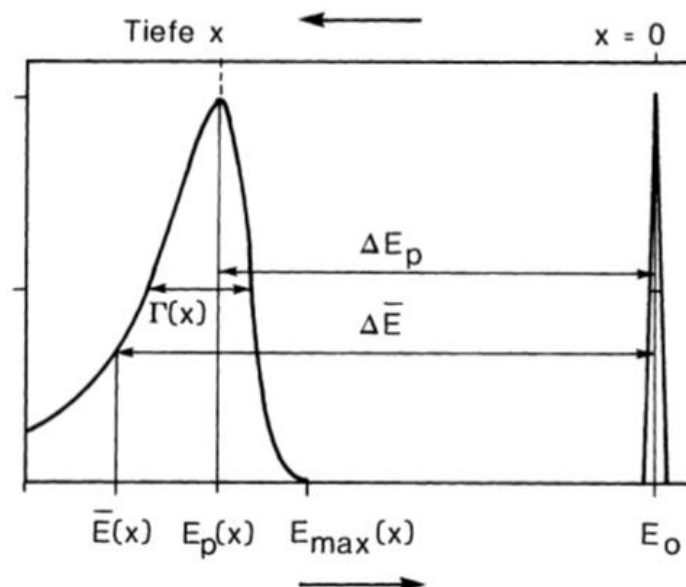


Fig. 9.9: Charakterisierende Größen der Energiespektren von Elektronen nach [ICRU 35]. Die Energieverteilungen sind auf das jeweilige Maximum normiert: $\bar{E}$ bzw. $\Delta\bar{E}$: mittlere Energie bzw. mittlerer Energieverlust, E_0 : mittlere bzw. wahrscheinlichste Energie beim Eintritt in das Medium, Γ : Breite des Energiespektrums in der Tiefe x im Medium, E_p : wahrscheinlichste Energie, ΔE_p : wahrscheinlichster Energieverlust.

Abbildung 2 Quelle: Krieger, Grundlagen der Strahlungsphysik und des Strahlenschutzes (S.281)

Elektronentubus

Ein Elektronentubus dient der Bündelung des Elektronenstrahls sowie zur Erzeugung eines homogenen Feldes der Elektronenstrahlung, da die Primärelektronen eine starke Aufstreuung in der Luft erfahren und im Gegensatz zu Photonenstrahlung nicht geradlinig verlaufen.

In den Elektronentubus können verschiedene Endrahmen mit unterschiedlicher Feldabmessung angebracht werden. Die Endrahmen bestehen aus 1 cm dickem Blei mit einer Dichte von 11,34

$\frac{g}{cm^3}$, was umgerechnet einer 11 cm tiefen Wasserschicht entspricht. Demzufolge können näherungsweise Elektronen mit einer Energie bis etwa 22 MeV vom Endrahmen absorbiert werden, das Strahlenfeld wird begrenzt. Dennoch ist zu beachten, dass bei der Wechselwirkung von Elektronenstrahlung und Blei (hohe Ordnungszahl) Bremsstrahlung entsteht, die besonders in Materialien mit hoher Ordnungszahl wahrscheinlich ist.

Ohne dem Einsatz eines Tubusses ähnelt die Querprofilverteilung der Elektronenstrahlung einer Gaußfunktion. Wird der Elektronentubus jedoch am Strahlerkopf befestigt, sorgt deren Geometrie für ein homogenes Querprofil.

Zum Schutz des Patienten wird durch Druckkontakt der Tubusoberfläche die Strahlung automatisch abgeschaltet und die Tischbewegung gestoppt.

Verfahren zur Bestrahlung mit dem Elektronentubus:

- 1) Der Elektronentubus wird direkt an die Oberfläche des Patienten gesetzt (95 cm)
- 2) Der Abstand der Unterkante des Tubusses zum Fokus der Strahlung beträgt 95 cm. Zur Oberfläche des Patienten wird ein Abstand zur Tubusunterkante von 5 cm eingehalten, sodass sich die Oberfläche des Patienten nun im Isozentrum befindet.
 - Nachteil: Die Primärelektronen werden bereits in der Luft aufgestreut, sodass der Feldrand nicht mehr "scharf" abgebildet werden kann

2 TIEFENDOSISVERLAUF VON ELEKTRONENSTRAHLEN

Die untenstehende Abbildung zeigt den typischen Tiefendosisverlauf für Elektronenstrahlung.

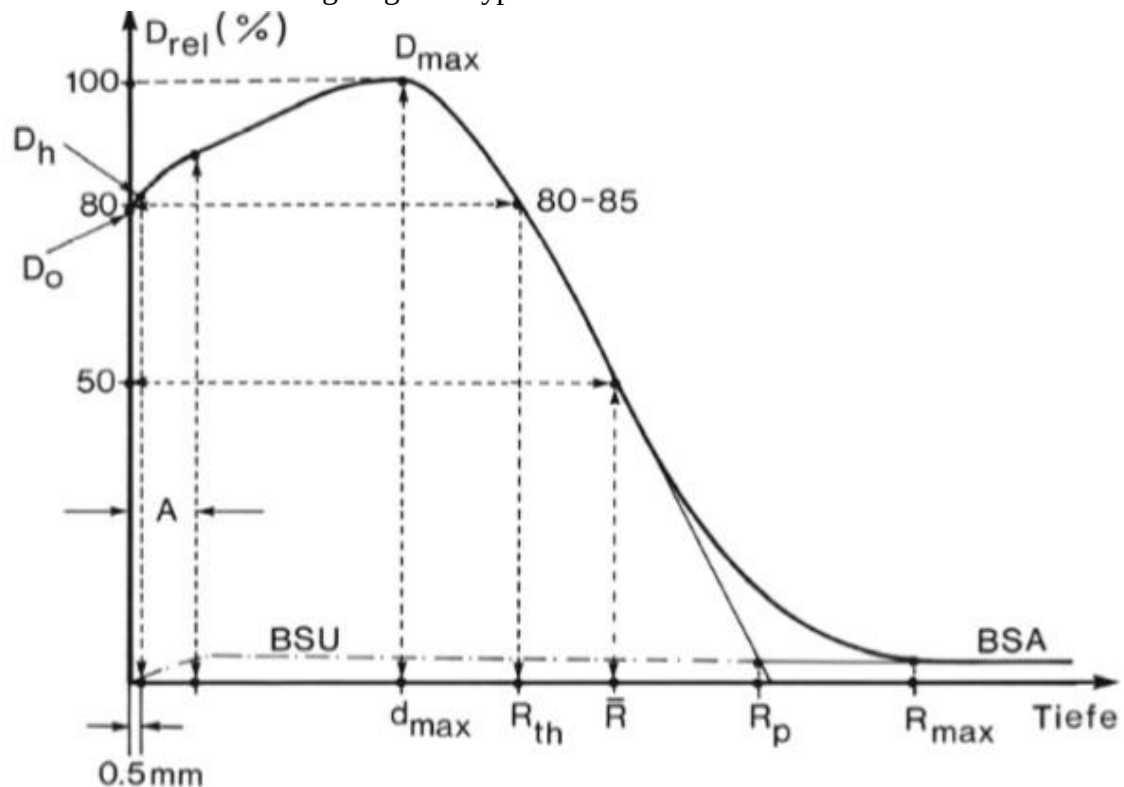


Fig. 17.6: Größen zur Beschreibung von Elektronentiefendosiscurven: $\bar{R}$: mittlere, R_p : praktische, R_{max} : maximale, R_{th} : therapeutische Reichweite, d_{max} : Dosismaximumstiefe, D_o : Oberflächendosis, D_H : Hautdosis (Dosis in 0,5 mm Tiefe), A: Aufbauzone, BSU: Bremsstrahlungsuntergrund (Anteil der durch Bremsstrahlungsphotonen verursachten Energiedosis im Bereich des Dosismaximums), BSA: Bremsstrahlungsausläufer (definiert als Anteil der Bremsstrahlung bei der praktischen Reichweite).

Abbildung 3 Elektronentiefendosisverlauf (Krieger, S.448)

Beschreibung des typischen Tiefendosisverlaufs für Elektronen:

- Hohe Oberflächendosis
- Steiler Dosisabfall in größeren Tiefen (Energieabhängig)
- Flacher Anstieg bis zur Tiefe des Ionisationsmaximums (besonders bei hohen Energien)
→ Dosismaximum nicht immer eindeutig bestimmbar
- Flache Dosisausläufe bzw. Bremsstrahlungsuntergrund

Entstehung des Dosismaximums

Aufbauzone - Leichter Anstieg der Dosis an der Oberfläche des Phantoms:

Der Bremsstrahlungsuntergrund aus dem Strahlerkopf des Beschleunigers zeigt nahe an der Oberfläche einen zusätzlichen Dosisanstieg aufgrund des Aufbaueffekts von Photonenstrahlung und deren Sekundärelektronen

Aufstreueffekt:

Der Anstieg des Tiefendosisverlaufs der Elektronenstrahlung ähnelt dem Aufbaueffekt bei Photonenstrahlung, jedoch ist die Ursache eine verschiedene

- Beim Eindringen in Materie werden die Elektronen durch Vielfachstreuung allmählich aus ihrer ursprünglichen Richtung abgelenkt. Das Strahlenbündel wird aufgestreut, sodass die Elektronenbahnen schräg zur Zentralstrahlachse verlaufen. Die Bahnneigung nimmt mit der Zahl der Wechselwirkungen zu
- Mit dem Vordringen der Elektronen im Medium werden diese zunehmend aufgestreut
- Elektronen geben durch Wechselwirkungen mit der Materie näherungsweise kontinuierlich ihre Energie ab (bis herab zu ca. 1 MeV)
 - ➔ Mit zunehmender Tiefe und Bahnneigung der Elektronen im Medium erhöht sich die Bahnlänge innerhalb einer Schicht und somit die Dosis
 - ➔ Ab einer gewissen Tiefe (hängt von der Elektronenenergie und dem Absorbermaterial ab) liegt die sogenannte vollständige Diffusion der Elektronen vor, was bedeutet, dass es keine weitere Aufstreuung des Elektronenstrahlbündels gibt

Der Aufstreueffekt ist bei geringen Energien am höchsten, da die Elektronen bei geringeren Energien eine stärkere Aufstreuung erfahren als bei hohen Energien

Oberflächendosis

Die Form des Elektronenspektrums und die Winkelverteilung der Elektronen beim Auftreffen auf die Oberfläche des Mediums bestimmen maßgebend die Höhe der Oberflächendosis. Folglich ist die Oberflächendosis niedriger, je niederenergetischer und aufgestreuter die Elektronen sind.

Bremsstrahlungsuntergrund:

Entstehung durch die Abbremsung der Elektronen in den Streufolien des Strahlerkopfes sowie im Phantom selbst $\triangleq$ Sekundärelektronen durch Bremsstrahlung

- Im Phantom selbst entsteht vergleichsweise wenig Bremsstrahlung
 - a) da die Ordnungszahl von Wasser deutlich geringer ist als die der Materialien des Strahlerkopfes
 - b) die Energie der Elektronen nimmt mit zunehmender Tiefe ab, weshalb die Wahrscheinlichkeit für Bremsstrahlung geringer wird

Der Bremsstrahlungsuntergrund kann in Näherung zur Oberfläche extrapoliert werden, sodass der Dosisbeitrag durch die Bremsstrahlung sichtbar gemacht wird. Dabei bleibt jedoch der Aufbaueffekt der Röntgenbremsstrahlung unberücksichtigt.

Größen zur Beschreibung des Tiefendosisverlaufs:

Die Größen, die im Folgenden beschrieben werden, sind in Abbildung 3 eingezeichnet.

Therapeutische Reichweite

- Für medizinische Zwecke:
- Keine eindeutige Definition: Zentralstrahltiefe bei 80%- oder 85%-Isodose in Wasser oder Weichteilgewebe

Faustformel:

$$R_{th} (cm) \approx \frac{\text{Eintrittsenergie (MeV)}}{3}$$

50%- Reichweite

- Tiefe des 50%-Dosisabfalls – dient zur Charakterisierung der Strahlungsqualität der Elektronen

Faustformel:

$$\bar{R} (cm) \approx \frac{\bar{E}_0 (MeV)}{2,33}$$
 mittlere Reichweite von Elektronen in Wasser oder Weichteilgewebe als Funktion der mittleren Elektroneneintrittsenergie

Praktische Reichweite

- Projektion des Schnittpunktes der Wendetangente an die Tiefendosiskurven mit dem Bremsstrahlungsausläufer auf die Tiefenachse. Die praktische Reichweite ist für die Tiefendosiskurve definiert.

Faustformel:

$$R_p (cm) \approx \frac{\text{Eintrittsenergie (MeV)}}{2}$$

Maximale Reichweite

- Einmündungstiefe der Tiefendosiskurve in den Bremsstrahlungsausläufer
- Abhängig von der spektralen Verteilung der Elektronen
- Maximale Reichweite wird besonders von hochenergetischen Einzelelektronen bestimmt, die nur wenig oder keinen Streuprozessen unterlagen

Vergleich von Photonen- und Elektronenstrahlung:

Photonenstrahlung:

Detektorsonde: Semiflex-Zylinderkammer 0,125 cm³

Referenzsonde: Semiflex-Zylinderkammer 0,125 cm³

Feldgröße 10 cm x 10 cm

Elektronenstrahlung:

Detektorsonde: Farmer-Kammer 0,6 cm³

Semiflex-Zylinderkammer 0,3 cm³

Elektronentubus 20 cm x 20 cm

Abbildung 4 dient lediglich der besseren Veranschaulichung des Tiefendosisverlaufs für Photonen- und Elektronenstrahlung. Dabei wird auf verschiedene Messbedingungen keine Rücksicht genommen und auch keine Umrechnungen der Feldgrößen vorgenommen.

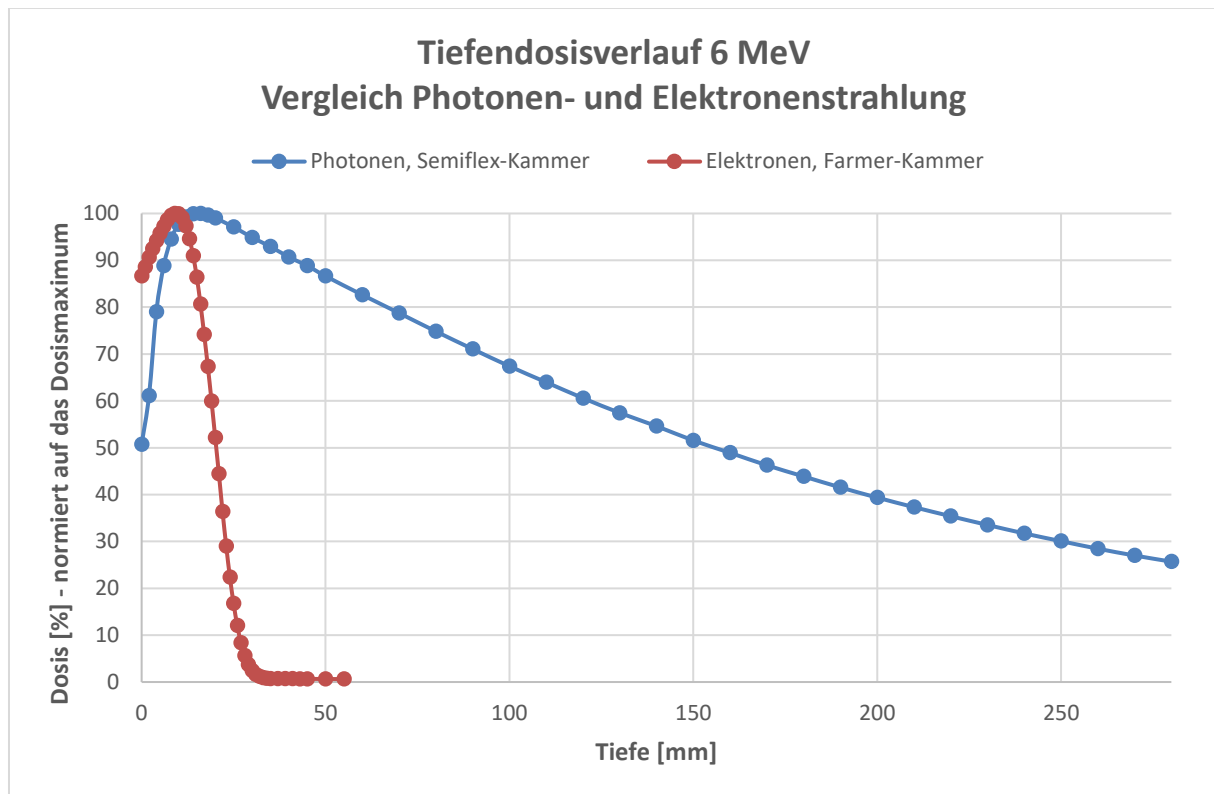


Abbildung 4 Vergleich des Tiefendosisverlaufs für Photonen- und Elektronenstrahlung im Wasserphantom bei 6 MeV

4 VERSUCHSAUFBAU

Zur Beginn des Praktikums wird das Wasserphantom aufgebaut und eingestellt, wie es in den vorangegangenen Protokollen generauer beschrieben worden ist.

Als Ionisationskammer wird die Rooskammer (Einstellung am Elektrometer: 200V) zur Aufzeichnung der Tiefendosisverläufe von Elektronenstrahlen verwendet, da diese eine gute Ortsauflösung in Strahlrichtung besitzt.

Der größte Tubus, mit der Feldabmessung 20 cm x 20 cm, wird am Strahlerkopf über dem Wasserphantom befestigt. Zuletzt wird die Referenzkammer (PTW: Semiflex 0,125 cm³; Einstellung am Elektrometer: 400V) am Rand des Strahlenfeldes platziert, was in untenstehender Abbildung 5 zu sehen ist.

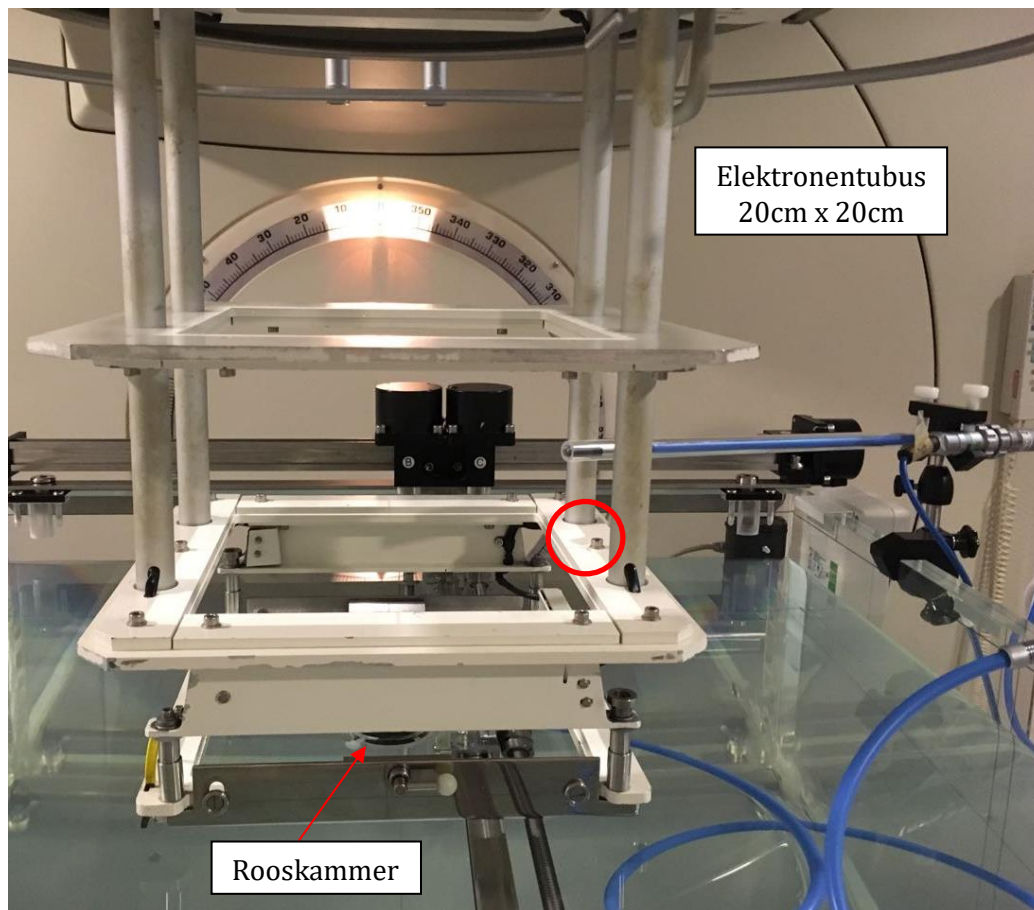


Abbildung 5 Versuchsaufbau zur Messung des TDV von Elektronenstrahlung unter Verwendung eines 20 cm x 20 cm Tubusses

Zudem wählen wir in der Linacsoftware die Interlock-Gruppe 8 und stellen zunächst den Nullpunkt der Kammer ein, indem der Center Check durchgeführt wird.

TIEFENDOSISVERLAUF FÜR VERSCHIEDENE ELEKTRONENEINTRITTSENERGIEN

Elektronentubus 20cm x 20cm

Detektorsonde: Roos-Flachkammer PTW

Referenzsonde: Kompaktkammer Semiflex 0,3 cm³ PTW

Aufzeichnung der Messwerte für Elektroneneintrittsenergien:

4MeV, 6MeV, 8MeV, 10MeV, 12MeV, 15MeV

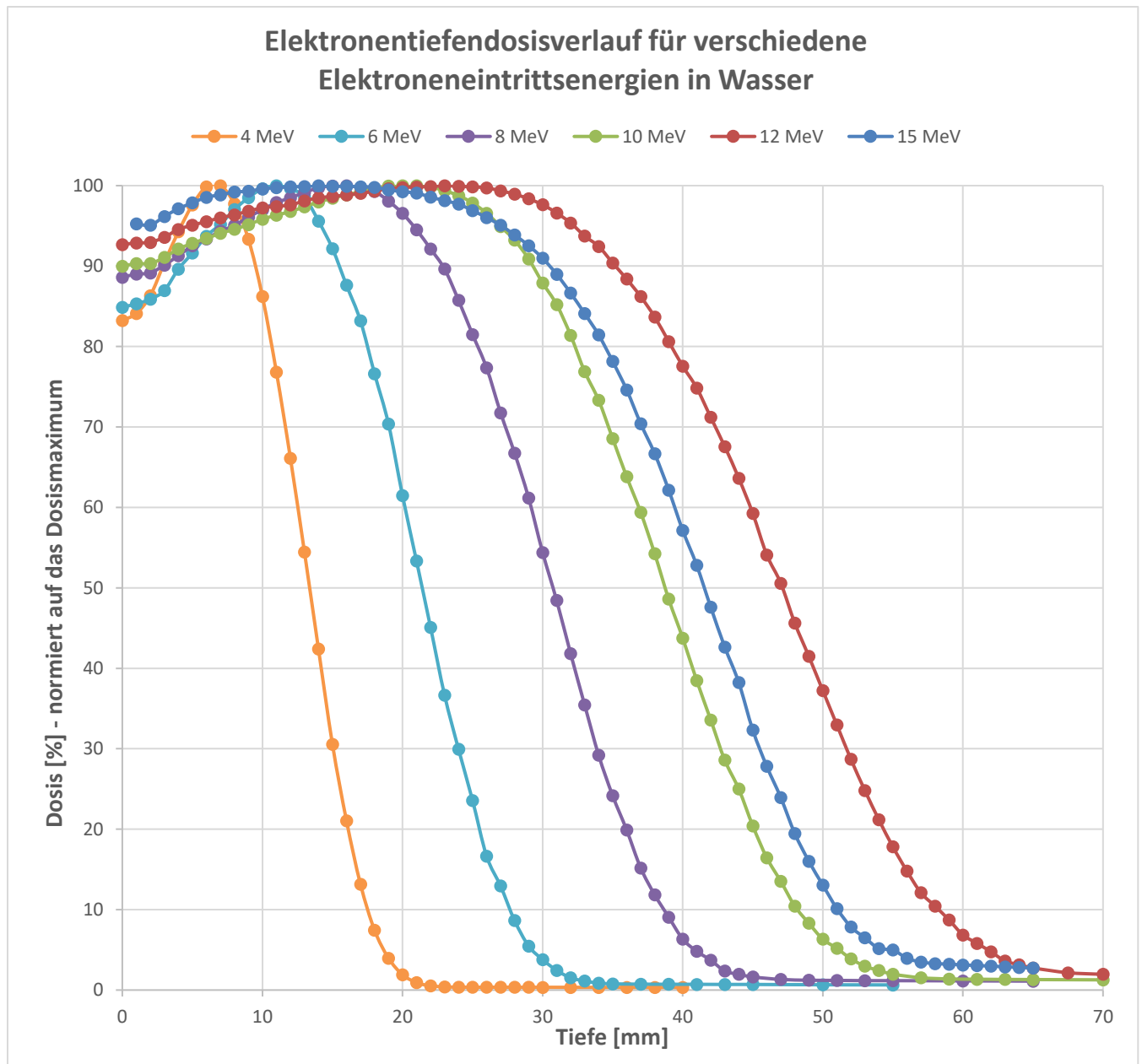


Abbildung 6 Relative Elektronentiefendosiskurve für verschiedene Elektroneneintrittsenergien im Wasserphantom bei Verwendung des Elektronentubusses 20 cm x 20 cm

Abbildung 6 zeigt den Tiefendosisverlauf für Elektronenstrahlung unterschiedlicher Eintrittsenergien. Die relative Dosis wurde dabei auf ihr Dosismaximum normiert.

Es zeigt sich:

Je geringer die Eintrittsenergie der Elektronenstrahlung, desto:

- geringer die Reichweite der Elektronen
- steiler der Abfall der Kurve
- stärker der Aufstreueffekt und desto geringer die Oberflächendosis
- geringer die Tiefe des Dosismaximums

Die Erklärungen der einzelnen Effekte wurden im oberen „Theorie-Teil“ unter den Überschriften Elektronenstrahlung und Tiefendosisverlauf von Elektronenstrahlen ausführlich beschrieben.

Rundtubus Durchmesser 5 cm

Detektorsonde: Semiflex Zylinderkammer 0,125 cm³

(die Positionierung der Kompaktkammer ist besonders wichtig bei der Messung eines kleinen Feldes)

Referenzsonde: wird wegen der Kleinheit des Feldes nicht verwendet

→ leicht verrauschte Messergebnisse

Aufzeichnung der Messwerte für Elektroneneintrittsenergien:

4 MeV, 6 MeV, 8 MeV, 10 MeV, 12 MeV, 15 MeV

Die nachfolgende Abbildung 7 zeigt den Tiefendosisverlauf der Elektronenstrahlung beim Einsatz eines Rundtubus (Durchmesser 5 cm) für unterschiedliche Eintrittsenergien.

Auf den ersten Blick gleichen die Tiefendosisverläufe bei Verwendung des Rundtubusses denen mit quadratischem Elektronentubus. In einem extra Abschnitt werden die Unterschiede deutlich sichtbar.

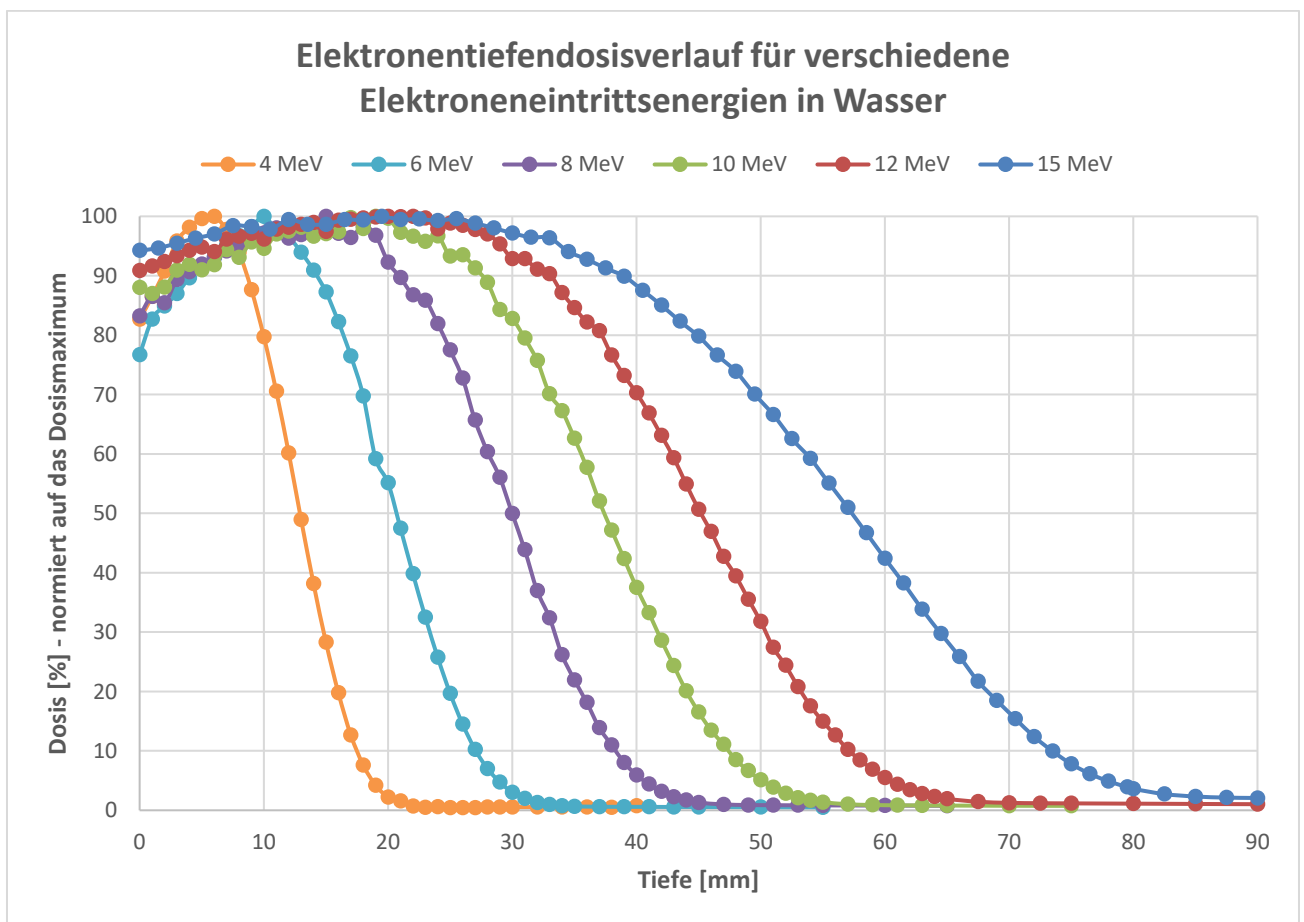


Abbildung 7 Relative Elektronentiefendosiskurve für verschiedene Elektroneneintrittsenergien im Wasserphantom bei Verwendung des Rundtubusses mit Durchmesser 5cm

TIEFENDOSISVERLAUF – VERGLEICH VERSCHIEDENER MESSKAMMERN

Elektronentubus 20cm x 20cm

Blaue Kurve:

Detektorsonde: Roos-Flachkammer PTW

Rote Kurve:

Detektorsonde: Farmer-Kammer 0,6 cm³

Referenzsonde: Kompaktkammer Semiflex 2,75 cm³ PTW

Aufzeichnung der Messwerte für Elektroneneintrittsenergien: 4MeV

Nachdem die Tiefendosisverläufe, wie im vorherigen Abschnitt beschrieben, mit einer Flachkammer für verschiedene Energien aufgezeichnet worden sind, wird nun die selbe Messreihe mit der Farmer-Kammer (Kompaktkammer) durchgeführt. Die Tiefendosisverläufe für die beiden verschiedenen Messsonden werden in der Auswertung miteinander verglichen. Der Übersichtlichkeit halber wird in der Abbildung 8 lediglich der Tiefendosisverlauf bei 4MeV dargestellt. Um zu untersuchen, wie sich die Eintrittsenergie der Elektronen auf die Abweichungen der Messergebnisse bei Verwendung verschiedener Messsonden auswirkt, wird Abbildung 9 erstellt.

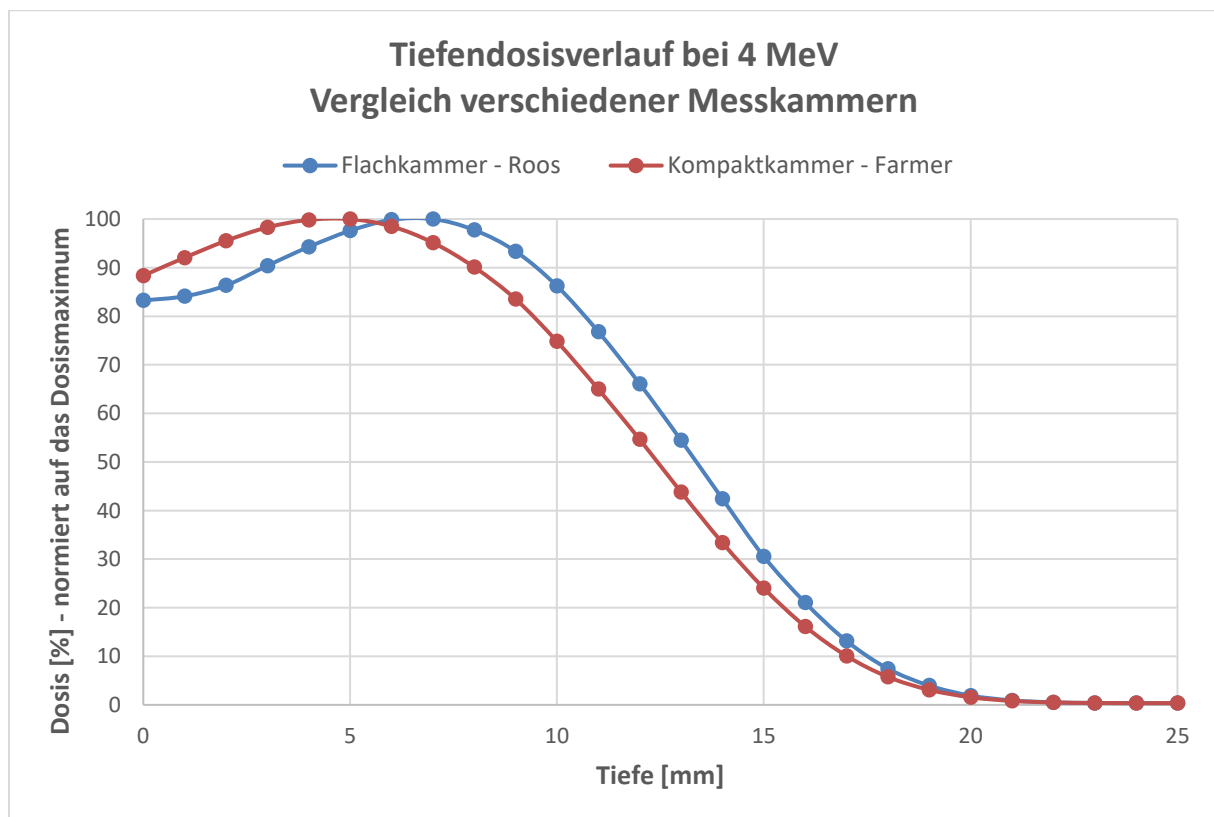


Abbildung 8 Relative Elektronentiefendosiskurve bei 4MeV. TDV-Vergleich der Flach- und Kompaktkammer

Es zeigt sich:

- das Dosismaximum befindet sich in geringerer Tiefe für die Aufzeichnung mit der Farmer-Kammer
- etwas flacherer Abfall der Kurve, aufgezeichnet mit der Farmer-Kammer, nach dem Dosismaximum

Elektronentubus 20cm x 20cm

Detektorsonde: Roos-Flachkammer PTW

Detektorsonde: Farmer-Kammer 0,6 cm³

Referenzsonde: Kompaktkammer Semiflex 2,75 cm³ PTW

Messwerte für Elektroneneintrittsenergien: 8 MeV, 10 MeV, 12 MeV, 15 MeV

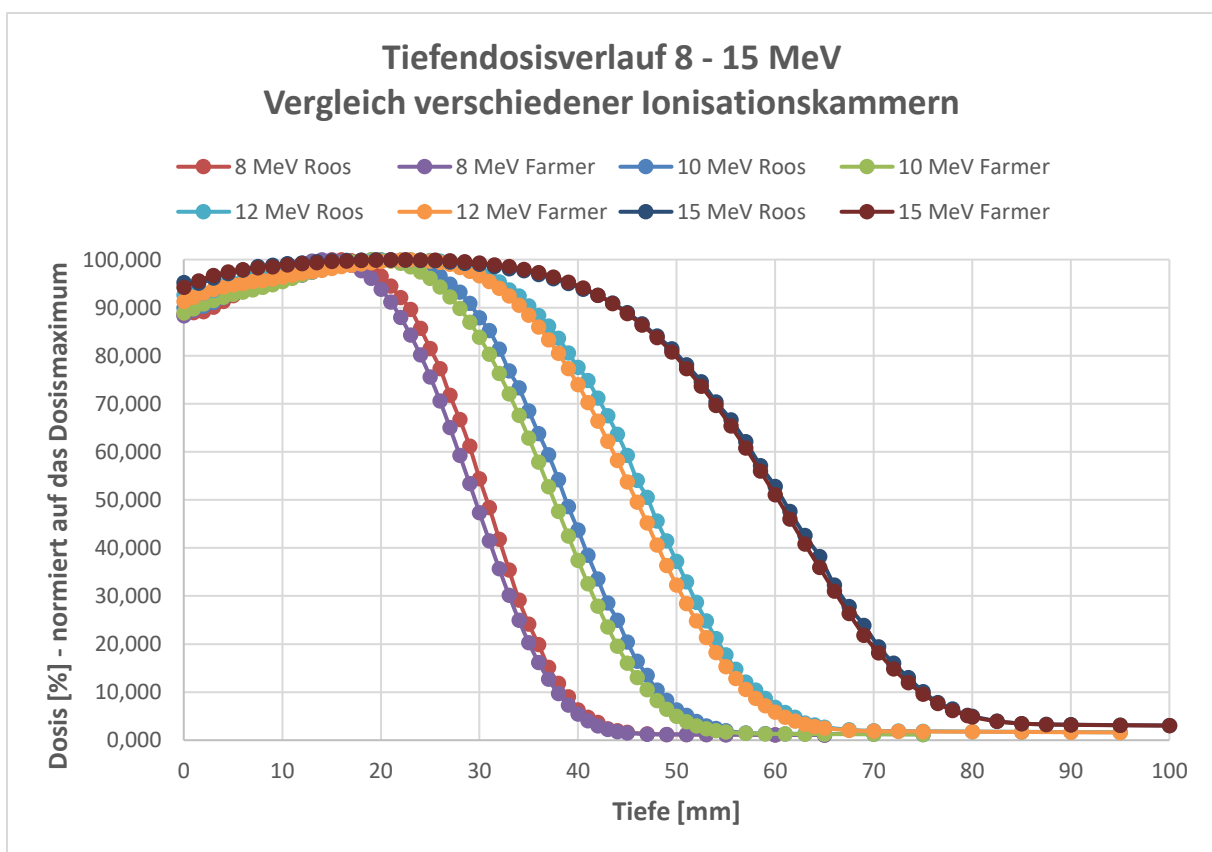


Abbildung 9 Relative Elektronentiefendosiskurve im Energiebereich 8MeV bis 15MeV. TDV-Vergleich der Flach- und Kompaktkammer

Auswertung:

Von der DIN 6800-2 wird empfohlen, für Messungen der Tiefendosisverläufe von Elektronenstrahlen (Elektronendosimetrie) eine Flachkammer, mit dünnen luft- oder wasseräquivalenten Strahleneintrittsfenstern, zu nutzen, da diese einen geringen

Strahlungsfeldstörungseffekt vorweisen. Flachkammern sollen wegen der parallelförmigen Anordnung der Elektroden nur senkrecht zur Bestrahlungsrichtung verwendet werden. Bei höheren Energien, ab 10 MeV, können ebenso kleinvolumige Zylinderkammern zur Messaufzeichnung des Tiefendosisverlaufs für Elektronen eingesetzt werden. In Abbildung 9 zeigt sich, dass diese Aussage erst bei 15 MeV zutrifft, hier ist der Tiefendosisverlauf der beiden Messsonden nahezu deckungsgleich.

Eine gute Messkammer zur Aufzeichnung des Tiefendosisverlaufs und einer guten örtlichen Auflösung besitzt ein kleines Messvolumen, um im Bereich der steilen Dosisgradienten exakte Ergebnisse zu liefern.

Werden Filme mit einer Filmschichtdicke im Mikrometerbereich verwendet, kann der Dosisverlauf exakt bestimmt werden.

TIEFENDOSISVERLAUF – VERGLEICH RUND- UND ELEKTRONENTUBUS

Rundtubus Durchmesser 5 cm

Quadratischer Elektronentubus 20 cm x 20 cm

Detektorsonde:

Semiflex Zylinderkammer 0,125 cm³ PTW

Detektorsonde:

Farmer-Kompaktkammer 0,6 cm³ PTW

Referenzsonde:

ohne

Referenzsonde:

Kompaktkammer Semiflex 2,75 cm³ PTW

Messwerte für Elektroneneintrittsenergien: 15 MeV

In diesem Abschnitt werden die Tiefendosisverläufe von Elektronenstrahlung bei Verwendung eines Rundtubus mit dem Durchmesser 5 cm und einem quadratischen Elektronentubus 20 cm x 20 cm miteinander verglichen. Als Messsonde wird in beiden Messreihen eine Zylinderkammer verwendet. Der Übersichtlichkeit halber wird in der Abbildung 10 lediglich der Tiefendosisverlauf bei 15 MeV dargestellt.

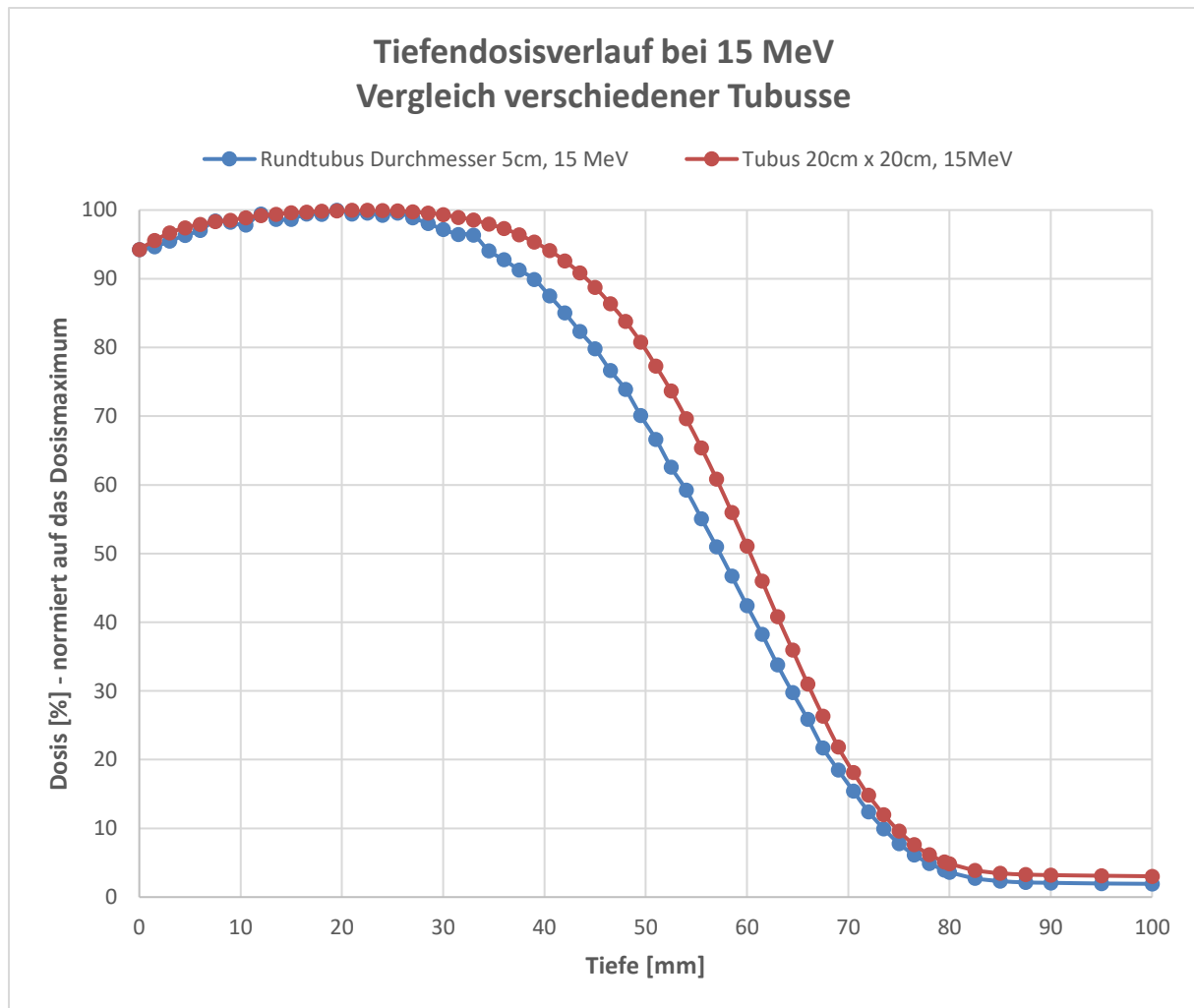


Abbildung 10 Relative Elektronentiefendosiskurve bei 15MeV. TDV-Vergleich von Rundtubus (5cm Durchmesser) und quadratischer Elektronentubus (20cm x 20cm)

Es zeigt sich im Vergleich zum 20 cm x 20 cm Tubus:
- TDV mit Rundtubus fällt früher ab

Auswertung:

Bei beiden Messreihen wird eine Zylinderkammer zur Aufzeichnung der Dosis verwendet. Somit ist ein Kammereffekt, wie es im vorgehenden Abschnitt beschrieben wurde, auszuschließen. Der Unterschied der Kurvenverläufe ist auf die Kleinheit der Feldgröße eines Rundtubusses zurückzuführen.

Dosisverluste sind in einem großen Feld weniger stark ausgeprägt wie in einem kleinen Feld. Die nach außen weggestreuten Elektronen werden in einem großen Feld durch seitliche Elektroneneinstreuung teilweise oder ganz, je nach Feldgröße und Elektronenenergie kompensiert. Ein Streubeitrag aus der „Peripherie“ des Zentralstrahls ist nicht mehr möglich, sobald der Ort der Streuung weiter vom Zentralstrahl entfernt ist als die maximale Reichweite der gestreuten Elektronen. In einem kleinen Feld bewirken die zur Seite gestreuten Elektronen bereits in geringer Tiefe eine besonders schnelle

Abnahme der Tiefendosis auf dem Zentralstrahl. Zudem ist zu beobachten, dass sich auch das Dosismaximum eines kleinen Feldes in geringerer Tiefe befindet, da die Elektronen schon früher herausgestreut worden sind.

QUELLEN

Grundlagen der Strahlungsphysik und des Strahlenschutzes, Springer (Hanno Krieger), 2012, Heidelberg

Strahlungsmessung und Dosimetrie (Hanno Krieger), 2011, Heidelberg

Medizinisch-technische Assistenz in der modernen Strahlentherapie. Praxisorientierter Leitfaden für Berufsausbildung und Routine, Springer (Birgit Schäfer, Peter Hödl), 1999, Berlin