

BM6 Dosimetrie

Elektronenstrahlung

Praktikum vom 06.12.2019

Dozent: Dr. Oliver Dohm

Stefanie Freund

Inhaltsverzeichnis

1. THEORETISCHE GRUNDLAGEN.....	3
2.1 AUFBAU VON STRAHLERKOPF UND KOLLIMATORSYSTEM BEI ELEKTRONENSTRAHLUNG	3
2.2 KENNGRÖßEN EINER TYPISCHEN ELEKTRONEN TIEFENDOSISKURVE	4
<i>Therapeutische Reichweite</i>	4
<i>50%-Reichweite</i>	4
<i>Praktische Reichweite</i>	5
<i>Maximale Reichweite</i>	5
2.3 UNTERSCHIEDUNG TIEFEN-IONEN-DOSIS UND TIEFEN-ENERGIE- DOSIS	5
2. MESSUNGEN IM WASSERPHANTOM	5
3.1 VERGLEICH DER TIEFENDOSISKURVE BEI ELEKTRONEN UND PHOTONEN	5
<i>Oberflächendosis</i>	6
<i>Aufstreueffekt</i>	6
<i>Bremsstrahlungsuntergrund</i>	6
3.2 VERGLEICH DER TIEFENDOSISKURVE FÜR VERSCHIEDENE ENERGIEEN	7
3.3 VERGLEICH EINER KOMPAKTKAMMER UND FLACHKAMMER	7
3.4 VERGLEICH VON GESCHLOSSENEM UND OFFENEM TUBUS.....	8
3.5 DOSISQUERPROFILE	10
<i>Einfluss von Volumeneffekt</i>	11
<i>Einfluss von Aufstreueffekt</i>	11
<i>Einfluss der geschlossene Bauform</i>	11
3. LITERATUR.....	11

1. Theoretische Grundlagen

Elektronenstrahlung eignet sich besonders gut für den Einsatz zur Behandlung von oberflächlichen Zielvolumina oder Zielvolumina die sich vor Risikoorganen befinden. Vorteile der Elektronenstrahlung sind vor allem die geringe Eindringtiefe, sowie der rasche Dosisabfall bis hin zu einem nahezu vollständigen Energieverlust der Elektronen in einer gewissen Tiefe. So kann das Gewebe hinter dem Tumor besser geschont werden.

2.1 Aufbau von Strahlerkopf und Kollimatorsystem bei Elektronenstrahlung

Aus dem Austrittsfenster kommt ein stark fokussiertes Elektronenstrahlbündel was einer scharfen Gaußverteilung entspricht. Das eignet sich aber nicht zum Bestrahlen. Das Ziel für die Bestrahlung ist es ein möglichst homogenes Querprofil zu erreichen. Daher muss der Strahl zunächst aufgeweitet werden. Zur Aufweitung und Homogenisierung gibt es zwei übliche Verfahren. Zum einen die Streufolienmethode, zum anderen Scanmethode. Meist wird meist die Streufolienmethode angewendet. Dabei werden Schwermetallfolien für die Aufstreuung benutzt. Die Homogenisierung ist dabei allerdings mit einem Verlust an mittlerer Elektronenenergie, einer Verbreiterung der Energiespektrums der Elektronen sowie der Entstehung von Bremsstrahlung verbunden.

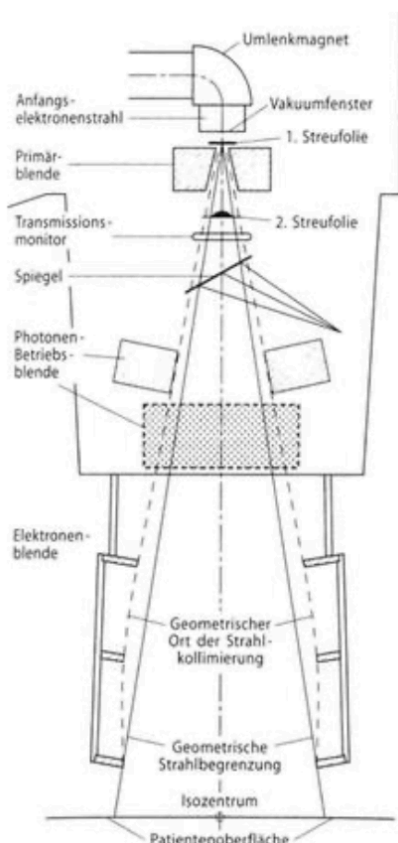


Abb. 1: Strahlerkopf und Kollimatorsystem

In der Luft zwischen Strahlerkopf und Phantomoberfläche wird dann ein merklicher Teil der Elektronen des primären Strahlenbündels gestreut. Um dennoch eine möglich homogene Dosisverteilung zu gewährleisten werden Elektronentubusse verwendet, siehe Abb.1. An den Blendenträgern der Tubusse entstehen zusätzliche Elektronen- Streubeiträge, die zum Feldausgleich mit verwendet werden. Diese Streubeiträge sind am größten für kleine Elektronenenergien und Materialien mit hoher Ordnungszahl Z . An den Tubussen können Endrahmen mit unterschiedlicher Feldabmessung angebracht werden. Die Endrahmen bestehen aus 1cm dickem Blei mit einer Dichte von $11,34 \text{ g/cm}^3$, was umgerechnet einer 11cm dicken Wasserschicht entspricht. Der Endrahmen kann Elektronen mit einer Energie bis etwa 22 MeV absorbieren und das Strahlenfeld somit begrenzen. Es ist jedoch zu beachten, dass bei der Wechselwirkung von Elektronenstrahlung und Blei Bremsstrahlung entsteht.

2.2 Kenngrößen einer typischen Elektronen Tiefendosiskurve

In Abbildung 2 ist der Verlauf einer Tiefendosiskurve für Elektronenstrahlung exemplarisch dargestellt. Dabei gibt es einige typische Kenngrößen die im Folgenden erläutert werden.

Abbildung 2: Elektronentiefendosiskurve

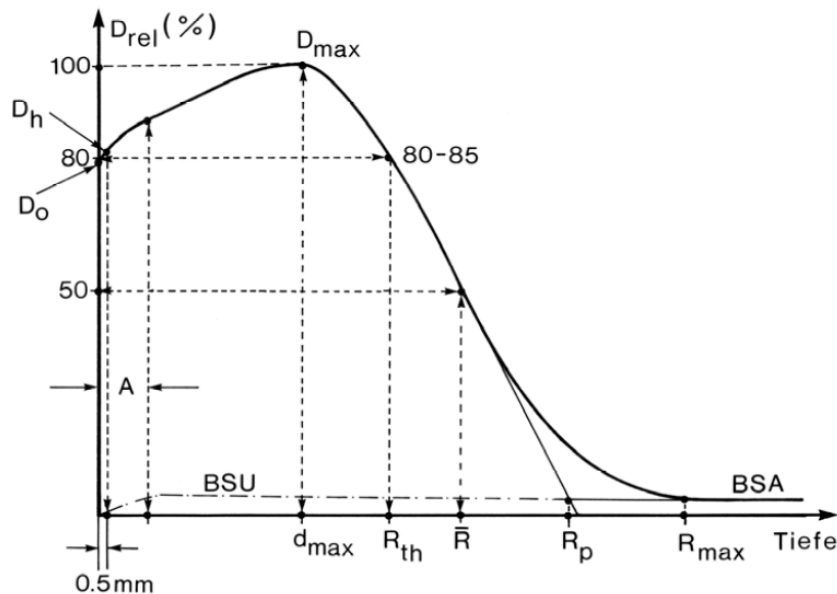


Fig. 17.5: Größen zur Beschreibung von Elektronentiefendosiskurven: $\bar{R}$: mittlere, R_p : praktische, R_{max} : maximale, R_{th} : therapeutische Reichweite, d_{max} : Dosismaximumstiefe, D_0 : Oberflächendosis, D_h : Hautdosis (Dosis in 0,5 mm Tiefe), A: Aufbauzone, BSU: Bremsstrahlungsuntergrund (Anteil der durch Bremsstrahlungsphotonen verursachten Energiedosis im Bereich des Dosismaximums), BSA: Bremsstrahlungsausläufer (definiert als Anteil der Bremsstrahlung bei der praktischen Reichweite).

Therapeutische Reichweite

Wird nach praktischen und medizinischen Gesichtspunkten festgelegt. Entspricht Zentralstrahltiefe bei 80%- oder 85%-Isodose in Wasser bzw. Weichteilgewebe. Faustformel:

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

50%-Reichweite

Entspricht Zentralstrahltiefe bei der 50% der Dosis abgefallen ist. Der Wert dient zur Charakterisierung der Strahlungsqualität der Elektronen. Faustformel: mittlere Reichweite von Elektronen in Wasser oder Weichteilgewebe als Funktion der mittleren Elektroneneintrittsenergie.

$$\bar{R} (cm) \approx \frac{\bar{E}_0 (MeV)}{2,33}$$

Praktische Reichweite

Entspricht der Projektion des Schnittpunktes der Wendetangente an die Tiefendosiskurven mit dem Bremsstrahlungsausläufer auf die Tiefenachse. Faustformel:

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

Maximale Reichweite

Entspricht der Einmündungstiefe der Tiefendosiskurve in den Bremsstrahlungsausläufer. Die Maximale Reichweite wird besonders von hochenergetischen Einzelelektronen bestimmt, die nur wenig oder keinen Streuprozessen unterlagen.

2.3 Unterscheidung Tiefen-Ionen-Dosis und Tiefen-Energie- Dosis

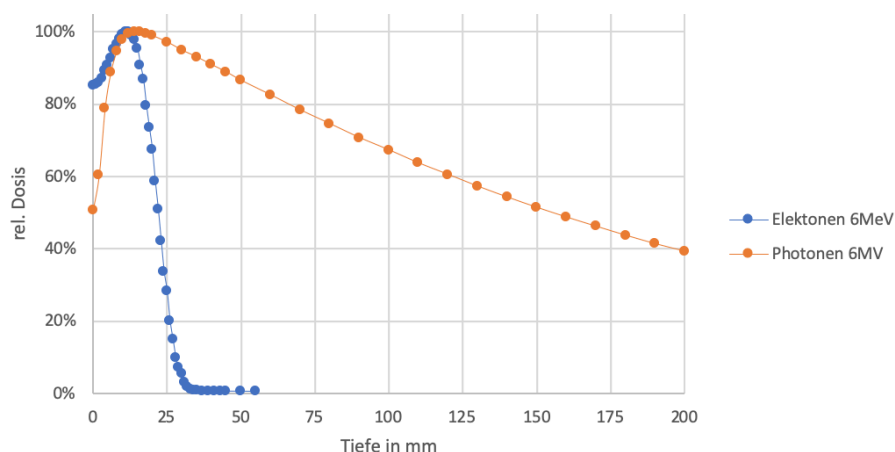
Bei allen nachfolgenden Messungen ist zu beachten: Tatsächlich gemessen wird die Ionen-Tiefen- Dosis. Interessanter für die weiteren Betrachtungen ist jedoch die Energie-Tiefen-Dosis. Für die Umrechnung wird das Bremsvermögensverhältnis Wasser zu Luft benötigt. Außerdem muss beachtet werden dass dieses energieabhängig ist. Die Umrechnung wurde in diesem Fall mithilfe der Software Mephisto direkt im Zuge der Messungen vorgenommen, gemäß DIN 6800-2.

2. Messungen im Wasserphantom

3.1 Vergleich der Tiefendosiskurve bei Elektronen und Photonen

Eingesetzt wurde ein offener Tubus der Länge 95cm und mit den Endrahmen Abmessungen von 20x20cm. Gemessen wurde mit einer Roos-Flachkammer bei SSD 95. Als Referenzkammer wurde die Semiflex- Kompaktkammer mit Kammervolumen 0,3 cm³ verwendet. Es wurde ein Tiefendosisverlauf bei 6MeV aufgenommen und graphisch in Abb. 3 dargestellt. Die grundsätzliche Form einer TDK für Elektronenstrahlen unterscheidet sich dabei deutlich von der eines Photonenstrahls.

Abbildung 3: Vergleich des Tiefendosisverlaufs bei Elektronen und Photonen:



Die TDK bei Photonenstrahlung weist eine niedrige Oberflächendosis auf, gefolgt von einem steilen Dosisaufbau bis hin zu einem Dosismaximum in einer gewissen Tiefe, alles bedingt durch den Aufbaueffekt. Zur Wiederholung: Der Aufbaueffekt bei Photonen ist dadurch zu erklären, dass die Sekundärelektronen zwar direkt an der Hautoberfläche freigesetzt werden, ihre Energie jedoch erst in der Tiefe abgeben. Denn gemäß des Klein-Nishina-Wirkungsquerschnitts nimmt die Wahrscheinlichkeit einer Vorwärtsstreuung der Sekundärelektronen bei hoher Photonenenergie zu. Nach dem Dosismaximum folgt ein flacher Dosisabfall verursacht durch Strahlschwächung im Medium, Dosisabnahme gemäß dem Abstandsquadratgesetz und Streubeiträge je nach bestrahltem Volumen.

Elektronenstrahlung hingegen weist eine höhere Oberflächendosis auf, einen flachen Dosisaufbau bis hin zu einem Dosismaximum in einer gewissen Tiefe, bedingt durch den Aufstreuereffekt. Gefolgt von einem steilen Dosisabfall mit Exponentieller Annäherung an den Bremsstrahlungsuntergrund. Im Folgenden werden die Zusammenhänge genauer erläutert.

Oberflächendosis

Die Höhe der Oberflächendosis wird maßgeblich bestimmt durch die Form des Elektronenspektrums und die Winkelverteilung der Elektronen beim Auftreffen auf die Oberfläche des Mediums. Folglich ist die Oberflächendosis größer, je höherenergetischer und weniger aufgestreut die Elektronen sind. Im Elektronenstrahlbetrieb trifft die Oberflächendosis dementsprechend hoch. Der anschließende Anstieg des Tiefendosisverlaufs der Elektronen ähnelt dem Aufbaueffekt bei Photonenstrahlung, jedoch ist die Ursache in diesem Fall maßgeblich der Aufstreuereffekt der Elektronen.

Aufstreuereffekt

Beim Eindringen in Materie werden die Elektronen durch Vielfachstreuung allmählich aus ihrer ursprünglichen Richtung abgelenkt. Das Strahlenbündel wird aufgestreut, sodass die Bahnen der Elektronen schräg zur Zentralstrahlachse verlaufen. Bahnneigung nimmt mit der Zahl der durchlaufenen Wechselwirkungen zu. Mit zunehmender Tiefe und Bahnneigung der Elektronen im Medium erhöht sich die Bahnlänge innerhalb einer Schicht und somit die Dosis in dieser Schicht. Die Tiefendosis auf dem Zentralstrahl wächst solange an, bis die vollständige Diffusion der Elektronen erreicht ist. Diese äußert sich im Dosismaximum. Einen geringen Beitrag zum Entstehen des Dosismaximums liefern auch die Bremsstrahlungsphotonen aus dem Strahlerkopf des Beschleunigers. Der bekannte Aufbaueffekt von Photonenstrahlung und deren Sekundärelektronen sorgen für einen zusätzlichen Dosisanstieg. Sobald die vollständige Diffusion der Elektronen erreicht wird, ist keine weitere Aufstreuung des Elektronenstrahlbündels möglich. Das führt folglich zu einem rapiden Dosisabfall. Die TDK nähert sich dabei exponentiell an den Bremsstrahlungsuntergrund an.

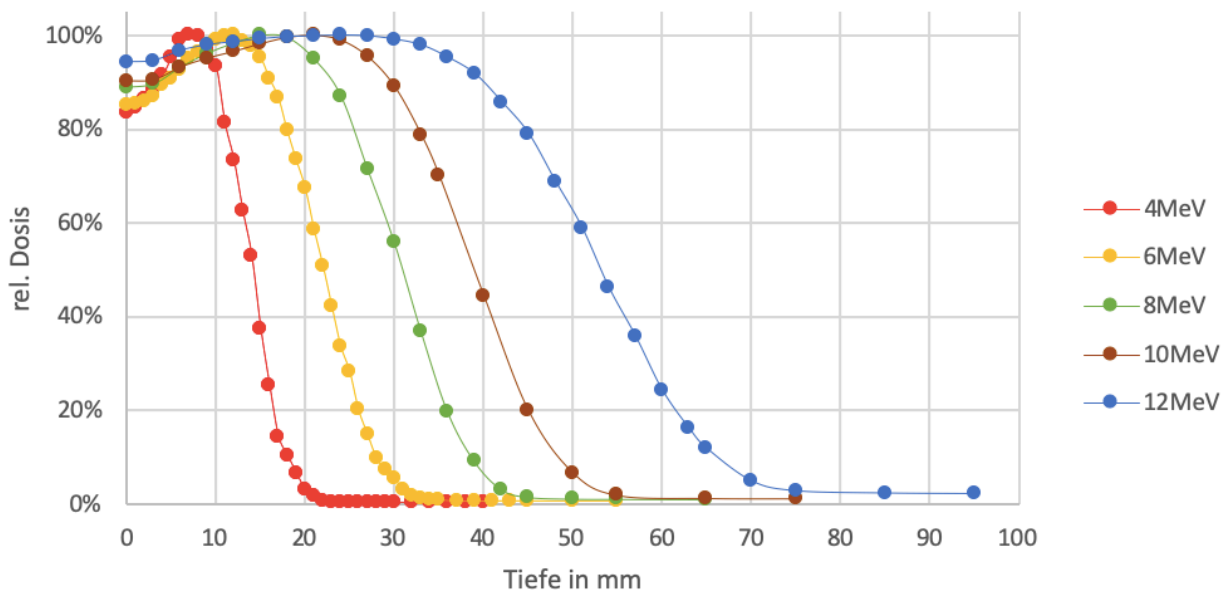
Bremsstrahlungsuntergrund

Dieser Untergrund ist der durch Bremsstrahlungsphotonen verursachte Dosisanteil. Dabei entsteht die Bremsstrahlung durch Wechselwirkung der Elektronen sowohl im Beschleunigerkopf als auch im Patienten/ Phantom. Die im Beschleunigerkopf entstandene Bremsstrahlen können durch geschicktes Design minimiert werden. Der weitaus größere Anteil entsteht jedoch in Patienten/ im Phantom. Auch in Tiefen die über die max. Elektronenreichweite hinaus gehen, wird über diese Photonen noch Dosis deponiert. Dieser Teil wird als Bremsstrahlungsausläufer beschrieben.

3.2 Vergleich der Tiefendosiskurve für verschiedene Energien

Eingesetzt wurde ein offener Tubus der Länge 95cm und mit den Endrahmen Abmessungen von 20x20cm. Gemessen wurde mit einer Roos-Flachkammer bei SSD 95. Als Referenzkammer wurde die Semiflex- Kompaktkammer mit Kammervolumen 0,3 cm³ verwendet. Es wurden TDK's im Elektronenstrahlbetrieb für folgende Energien aufgenommen: 4MeV, 6MeV, 8MeV, 10MeV, 15MeV. Die Daten werden in Abbildung 4 graphisch dargestellt und anschließend miteinander verglichen.

Abbildung 4: Vergleich der normierten TDK's bei unterschiedlichen Energien im Elektronenstrahlbetrieb



Die Energie der primären Elektronen beeinflusst eine Tiefendosiskurve signifikant. Mit größer werdender Energie steigt folglich die Oberflächendosis und auch die max. Reichweite der Elektronen nimmt zu. Dadurch verschiebt sich das Dosismaximum zu größeren Tiefen hin und die Dosisgradienten (vor sowie nach) dem Dosismaximum flachen ab.

3.3 Vergleich einer Kompaktkammer und Flachkammer

Eingesetzt wurde ein offener Tubus der Länge 95cm und mit den Endrahmen Abmessungen von 20x20cm. Es wurde SSD 95 eingestellt und mit der Semiflex- Kompaktkammer zwei Tiefendosisverläufe gemessen, wobei das Kammervolumen 0,125 cm³ betrug. Die Messungen wurden im Elektronenstrahlbetrieb durchgeführt einmal bei 4MeV und 15MeV. Die Daten werden graphisch dargestellt und zusammen mit den zuvor aufgenommenen Messdaten von der Roos-Flachkammer bei jeweils 4MeV und 15MeV und verglichen, siehe Abbildungen 5 und 6.

Vergleicht man die TDK's bei der hohen Energie von 15MeV, stimmen die Messwerte von Kompaktkammer und Flachkammer nahezu überein, siehe Abbildung 6. Vergleicht man den Kurvenverlauf jedoch bei der niedrigen Energie von 4MeV, so fällt auf, dass sich das Dosismaximum bei der Kompaktkammer in geringerer Tiefe befindet und die Tiefendosiskurve etwas flacher abfällt, siehe Abbildung 5.

Abbildung 5: Vergleich Kompaktkammer- Flachkammer bei 4MeV

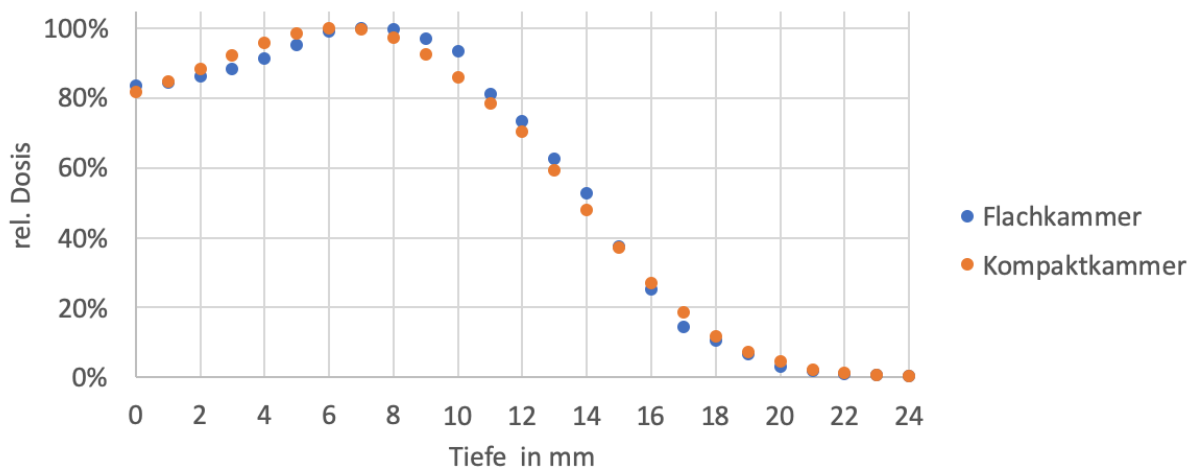
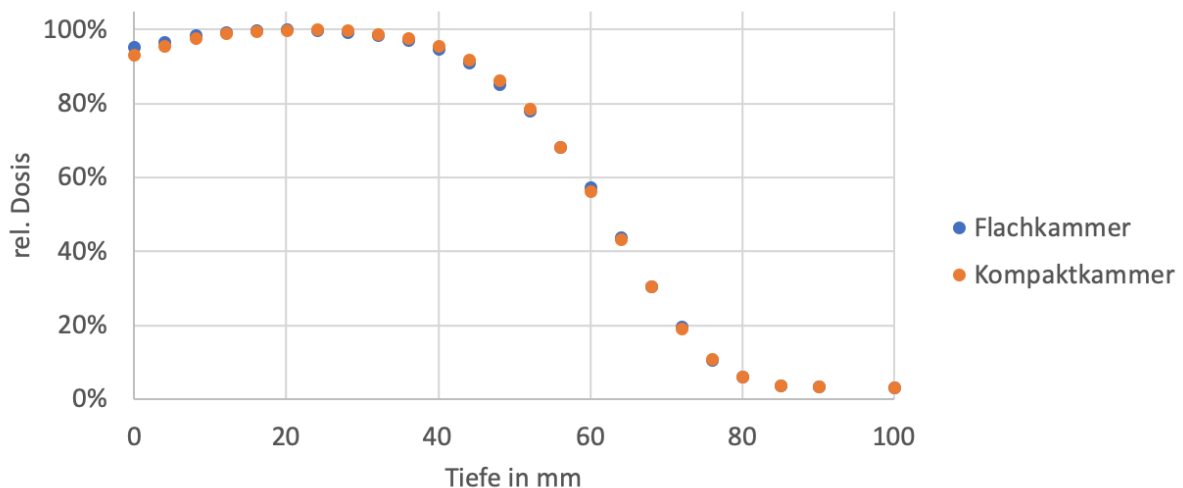


Abbildung 6: Vergleich Kompaktkammer- Flachkammer bei 15MeV



Gemäß DIN 6800- 2 sind im unteren Energiebereich Flachkammern vorzuziehen und Kompaktkammern nur für Messungen ab 10 MeV empfohlen. Grund dafür ist, dass Flachkammern einen geringeren Strahlfeldstörungseffekt vorweisen. Bei höheren Energien fällt der Unterschied zwischen kleinvolumigen Zylinderkammern und Flachkammern geringer aus. Um die notwendige Ortsauflösung für die steilen Dosisgradienten zu gewährleisten, muss jedoch generell ein kleines Messvolumen verwendet werden.

3.4 Vergleich von geschlossenem und offenem Tubus



Abbildung 7: verwendeter Rundtubus

Es wird ein geschlossenen Rundtubus mit einem Durchmesser von 5cm verwendet (siehe Abbildung 7) und der Tiefendosisverlauf für 4MeV und 15MeV Elektronenstrahlung bei SSD95 gemessen. Eine Referenzmessung ist aufgrund der geschlossenen Bauform des Tubus nicht möglich. Im vorangehenden Versuchsteil wurden die gleichen Messpaarmeter verwendet nur mit einem offenem Tubus mit 20x20cm Endrahmen. Die TDK's von offenem Tubus und geschlossenem Rundtubus werden in den Abbildungen 8 und 9 graphisch dargestellt und verglichen.

Abbildung 8: Vergleich verschiedener Tubusse bei 4 MeV

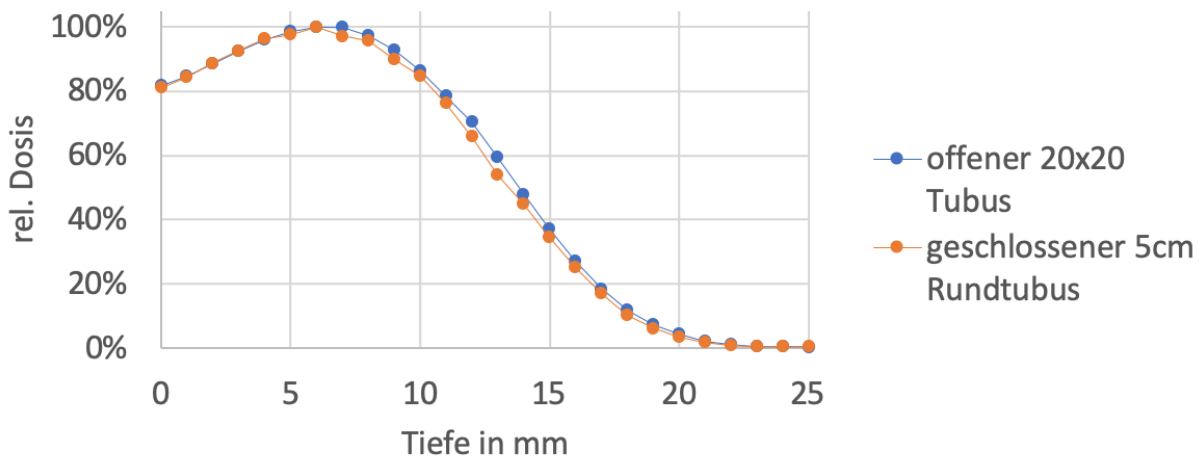
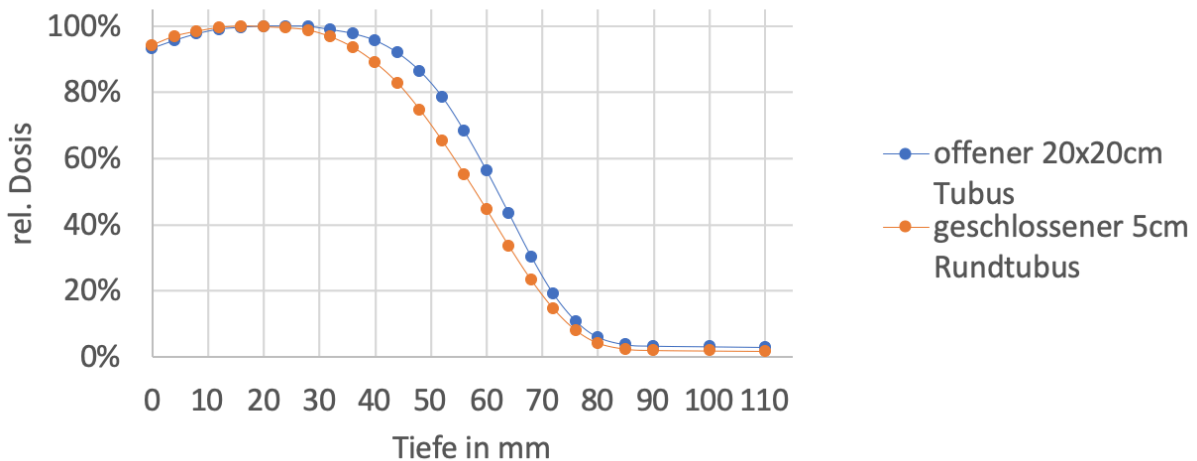


Abbildung 9: Vergleich verschiedener Tubusse bei 15 MeV



Die TDK's welche bei einer Elektronenenergie von 4MeV gemessen wurden und zeigen nur sehr geringe Unterschiede im Dosismaximum und im Bereich des Dosisabfalls. Bei einer Energie von 5MeV sind Abweichungen jedoch deutlicher sichtbar. Man sieht, dass die relative Dosis bei der Messung mit dem Rundtubus geringer ausfällt als bei dem offenen Tubus. Das Dosismaximum liegt nicht so tief wie beim offenen Tubus und die Dosis fällt in der Tiefe stärker ab. Das ist zum einen durch die geschlossene Bauform zu erklären. Durch den geschlossenen und recht massiven Tubus kommt es zu mehr Wechselwirkungen innerhalb des Tubus. Das verringert die max. Energie der Elektronen und das Dosismaximum verschiebt sich geringfügig zur Oberfläche hin. Zum anderen lässt sich die geringere Dosis durch die kleine Feldgröße beim Rundtubus erklären. In einem großen Feld können die nach außen weggestreuten Elektronen durch seitlich Elektronen-Einstreuung kompensiert werden. 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. Die genannten Effekte verstärken sich bei höheren Energien.

3.5 Dosisquerprofile

In diesem Versuchsteil wurden Querprofile in 16mm und 40mm Tiefe gemessen. Einmal mit dem Rundtubus bei einer Feldbreite von 5cm und einmal mit dem offenen Tubus mit 20cm Feldbreite. Gemessen wurde dabei mit einer Roos-Flachkammer bei SSD 95. Als Referenzkammer wurde die Semiflex- Kompaktkammer mit Kammervolumen $0,3 \text{ cm}^3$ verwendet. Die Messdaten werden anschließend graphisch aufgetragen. Zunächst wird generell der Einfluss der Messkammer auf Querprofile erläutert und anschließend der Einfluss von Tubusbauform, Feldform und Messtiefe diskutiert.

Abbildung 10: normierte Querprofile bei offenem 20x20cm Tubus

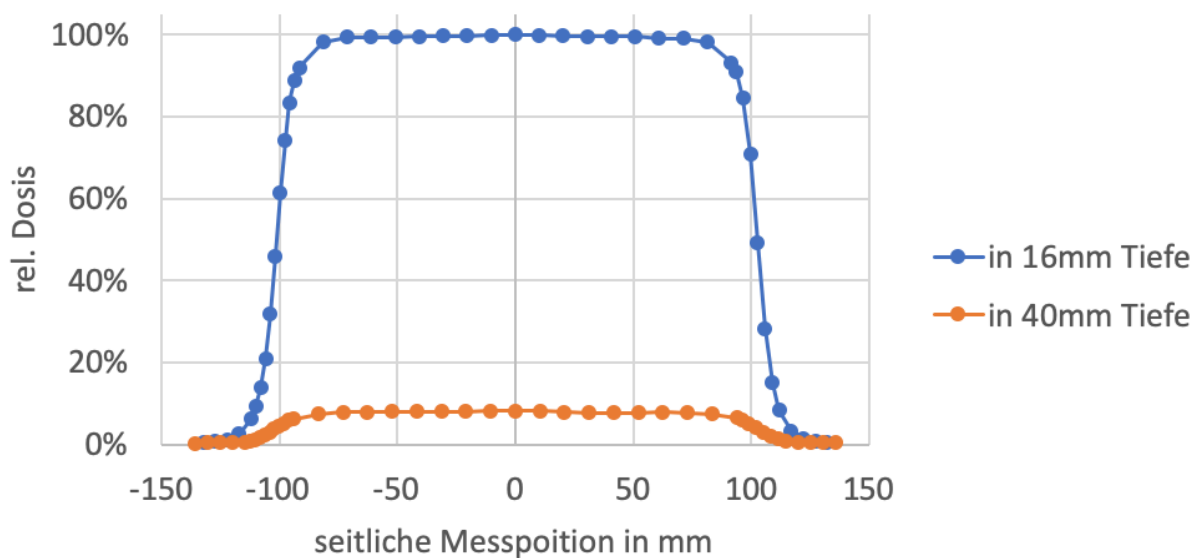
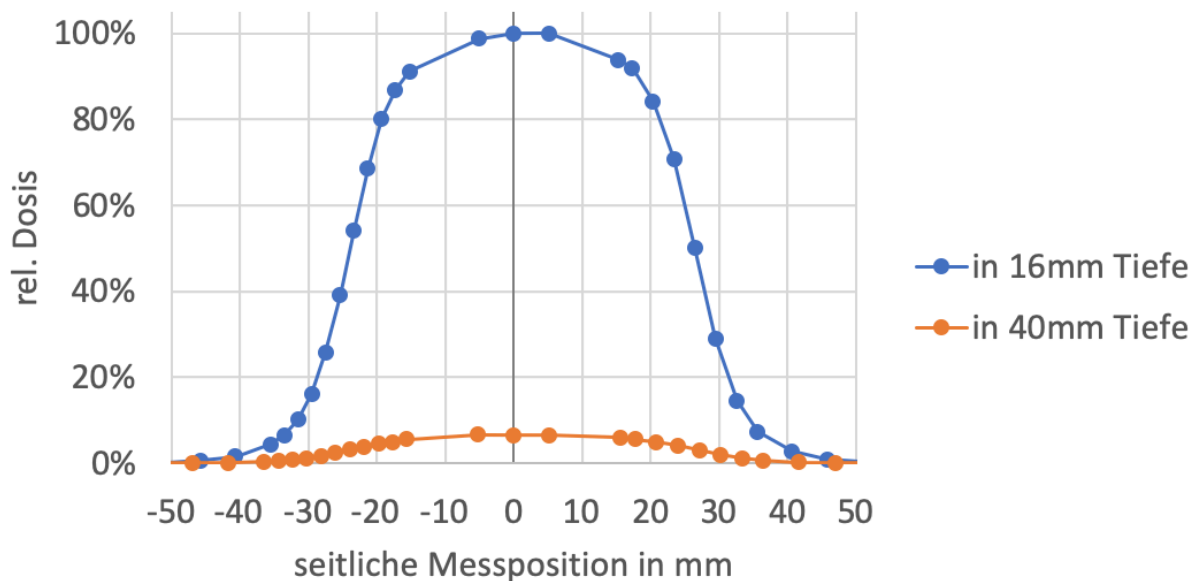


Abbildung 11: normierte Querprofile bei geschlossenem Rundtubus mit 5cm Durchmesser



Man erkennt keine scharfen Feldbegrenzungen sondern einen verbreiterten Halbschatten. Das lässt sich zum einen mithilfe des Volumeneffekts erklären.

Einfluss von Volumeneffekt

Der Volumeneffekt spielt eine entscheidende Rolle bei der Messung von Dosisquerprofilen. Große Messkammervolumen haben einen weichzeichnenden Effekt auf Profilmessungen, d.h. steile Profilflanken werden verwischt. Zurückzuführen ist der Volumeneffekt auf die Tatsache, dass eine Ionisationskammer kein unendlich kleiner Detektor sein kann, sondern eine gewisse räumliche Ausdehnung besitzt und somit das Querprofil verfälscht. Der Grund für die Verfälschung ist, dass ein Dosismittelwert über das Messvolumen gebildet wird, was nicht der Realität entspricht, da es Punkte mit viel und wenig Dosis in der Ionisationskammer selbst gibt. Daher ist zu empfehlen das Querprofil mit einem möglichst kleinem Messvolumen zu messen, um die Integration über das Volumen möglichst klein und somit den Fehler des Volumeneffektes gering zu halten. Es wird jedoch an Algorithmen gearbeitet mithilfe derer man über eine Fouriertransformation den Messkammervolumen-Effekten aus Profilmessungen herausrechnen kann.

Einfluss von Aufstreuung

Betrachtet man den Dosisquerverlauf einer Messung in den verschiedenen Tiefen, so ist auffällig, dass das Dosisquerprofil bei größeren Tiefen am Rand weniger steil abfällt, als bei geringeren Tiefen. Das liegt daran, dass die Elektronen in größeren Tiefen mehr Aufstreuung erfahren haben. Auch die Feldgröße nimmt mit größeren Tiefen zu.

Einfluss der geschlossenen Bauform

Außerdem fällt auf, dass der Halbschatten beim Rundtubus im Vergleich zum offenen Tubus zusätzlich verbreitert ist, siehe Abbildung 11 im Vergleich zu Abbildung 10. Der Dosisabfall ist flacher und deutlicher abgerundet. Das lässt sich erneut durch die vermehrten Wechselwirkungen mit dem Metall des geschlossenen Tubus sowie dessen runde Bauform mit kleiner Feldgröße erklären. Bei kleinen Feldern führt die Aufstreuung der Elektronen schon in sehr geringen Tiefen zu Dosisverlusten am Rand. Dieser Streuverlust kann bei kleinen Feldern, im Vergleich zu größeren, nicht durch seitliche Einstreuung kompensiert werden.

3. Literatur

- Krieger, Hanno (2018): Strahlungsquellen für Technik und Medizin, 3. Auflage, Springer Fachmedien Wiesbaden
- Krieger, Hanno (2013): Strahlungsmessung und Dosimetrie, 2. Auflage, Springer Fachmedien Wiesbaden