



Dosimetrie
Protokoll vom 06.12.2019

Elektronenstrahlung: Tiefendosiskurve und Querprofile

Dozent: Dr. Oliver Dohm
Protokollantin: Carina Hinterkopf

Inhaltsverzeichnis

INHALTSVERZEICHNIS	2
1 THEORETISCHE GRUNDLAGEN ZUR ELEKTRONENSTRAHLUNG	3
1.1 UMLENKUNG UND HOMOGENISIERUNG DES ELEKTRONENSTRAHLBÜNDELS.....	3
1.2 KOLLIMATION DES ELEKTRONENSTRAHLS.....	4
1.3 VERLAUF DER TIEFENDOSISKURVE BEI ELEKTRONENSTRAHLUNG	5
2 MESSUNGEN IM WASSERPHANTOM	6
2.1 VERGLEICH DER TIEFENDOSISKURVEN FÜR VERSCHIEDENE ELEKTRONENENERGIEN	6
2.2 VERGLEICH VERSCHIEDENER MESSKAMMERN BEI ELEKTRONENSTRAHLUNG.....	7
2.3 VERGLEICH VERSCHIEDENER TUBUS BAUFORMEN.....	8
2.4 DOSISQUERPROFILE BEI ELEKTRONENSTRAHLUNG	9
3 ZUSAMMENFASSUNG	10
4 LITERATUR	11

1 Theoretische Grundlagen zur Elektronenstrahlung

1.1 Umlenkung und Homogenisierung des Elektronenstrahlbündels

Der interne Elektronenstrahl eines Linearbeschleunigers ist ein nur wenige Millimeter dicker, gepulster Nadelstrahl, der in dieser Form therapeutisch nicht verwendbar ist. Erst durch Umlenkung und Fokussierung, sowie Homogenisierung und Kollimation kann die Elektronenstrahlung gezielt zur Therapie eingesetzt werden.

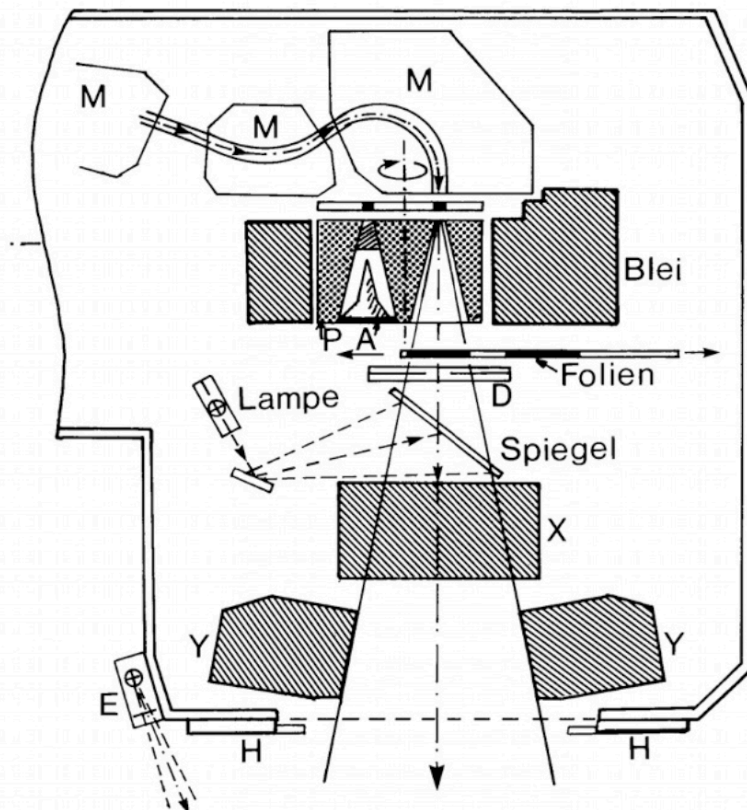


Abb. 1: Strahlerkopf eines Elektronenlinearbeschleunigers

In Abbildung 1 ist der Strahlerkopf eines Elektronenlinearbeschleunigers dargestellt, wobei die Abkürzung M die Slalom-Magnete zur Umlenkung des Elektronenstrahls meint, D den Doppeldosismonitor, P die Primärkollimation und A den Ausgleichkörper für Photonenstrahlung mit Beamhardener und Elektronenfänger. Mit E ist der Entfernungsmesser beschriftet, mit H die Halterung für Tubus und Filter und X und Y sind die Kollimatorblenden. Die dargestellte Lampe mit Spiegel bildet das Lichtvisier zur Einstellung des Strahlenfeldes. Die eingezeichneten Folien sind Ausgleichsfolien für Elektronenstrahlung, auf welche nachfolgend genauer eingegangen wird.

Die beschleunigten Elektronen erfahren durch Umlenkmagneten eine Richtungsänderung zum Austrittsfenster hin, an dem sie das Hochvakuum verlassen. Danach treffen sie auf die erste Streufoleie, welche den Hauptbeitrag zum Feldausgleich leistet. Je nach Energie folgen mehrere weitere Streufoleien um ein homogenes Strahlenfeld zu erreichen. Unerwünschte Effekte bei der Aufstreuung der Elektronen sind die Erzeugung von Bremsstrahlung, sowie die Verbreiterung des Elektronenenergiespektrums und der Energieverlust. Ein optimales

Verhältnis zwischen effektiver Aufstreuung und Minimierung unerwünschter Effekte wird durch Streufohlen erreicht, die aus Materialien hoher Ordnungszahl bestehen. In Abbildung 2 ist der Vergleich von Querprofilen für Elektronenstrahlung dargestellt. Einmal ohne den Einsatz einer Streufohle (a) und rechts mit Aufstreuung des Nadelstrahls mittels einfacher Schwermetallstreufohle (b).

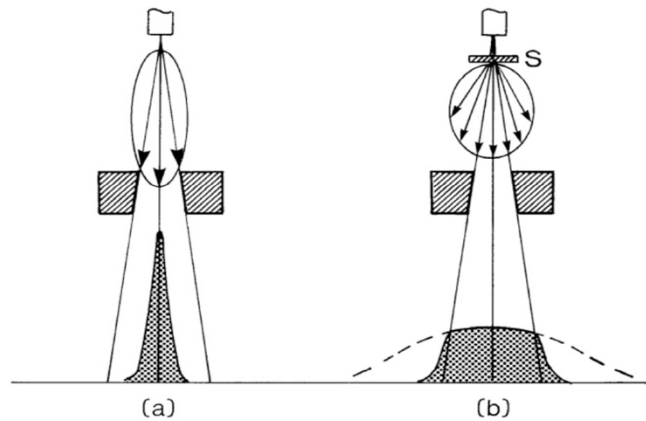


Abb. 2: Strahlquerprofile für Elektronenstrahlung

1.2 Kollimation des Elektronenstrahls

Die Begrenzung des Strahlenfeldes erfolgt mittels mehrstufigem Kollimatorsystem. Die erste Kollimation des Elektronenstrahlenfeldes findet mit einem unveränderlichen Primärkollimator bereits zwischen der ersten und zweiten Streufohle statt. Dieser ist analog zum Photonenbetrieb und gibt die maximale Feldgröße vor. Eine weitere Formung des Strahlenfeldes erfolgt wie beim Photonenbetrieb durch die vier Blockblenden in X- und Y-Richtung. Sie dienen hier aber lediglich zur groben Abgrenzung des Strahlenfeldes. So muss beispielsweise für die Einstellung eines 20x20 cm Elektronenfeldes eine Feldgröße von 26x28 cm eingestellt werden. Dies variiert je nach Elektronenenergie und Tubus. Die Feineinstellung der Elektronenfeldgröße erfolgt dann letztendlich durch die Wahl des entsprechenden Tubus. Die MLC dürfen im Elektronenbetrieb nicht genutzt werden um keine zusätzliche Photonenkontamination zu verursachen. Falls eine asymmetrische Feldform bestrahlt werden soll, muss eine individuelle Bleiabschirmung für den Patienten angefertigt werden, welche am Endrahmen, d.h. patientennah angebracht wird.

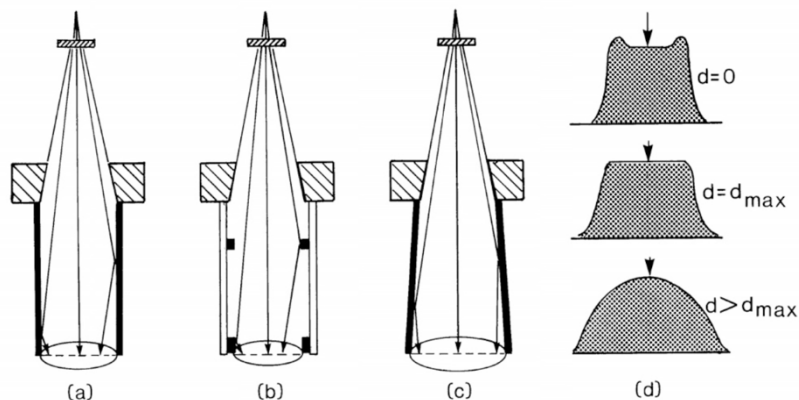


Abb. 3: Kollimation des therapeutischen Elektronenstrahlenbündels mit Tubussen

Abbildung 3 zeigt drei verschiedene Bauformen für Elektronentubusse: einen parallelen Schwermetalltubus (a), einen parallelen Leichtmetalltubus mit Bleieinsätzen (b) und einen leicht divergenten Tubus mit geringer Aufsättigung (c). Die entsprechende Veränderung des Dosisquerprofils mit der Tiefe d bei Homogenisierung im Dosismaximum ist am rechten Bildrand dargestellt (d).

Der Tubus wird am Strahlerkopf angebracht, wobei sich das untere Ende unmittelbar am Patienten befindet (nahezu Hautkontakt). Es ist wichtig die Feineinstellung des Elektronenfeldes möglichst patientennah durchzuführen, um eine erneute Aufstreuung des Strahlenbündels durch Wechselwirkungen zwischen Elektronen und Luft gering zu halten.

Neben der Kollimation des Strahlenfeldes hat der Tubus auch die Funktion das Dosisquerprofil zu optimieren. Das ursprünglich gaußförmige Querprofil wird mit Elektronen aufgefüllt, die eine Rückstreuung durch den Tubus erfahren.

1.3 Verlauf der Tiefendosiskurve bei Elektronenstrahlung

In Abbildung 4 ist der Verlauf einer Tiefendosiskurve für Elektronenstrahlung exemplarisch dargestellt. Es kommt zu einem Anstieg der Dosis bis zum Dosismaximum $D_{\max}$, danach fällt die Kurve innerhalb weniger Zentimeter ab. Die therapeutische Reichweite von Elektronenstrahlung ist die Reichweite im Gewebe, in der noch 80% der Maximaldosis platziert werden. Sie ist definiert und kann klar reproduziert werden. In der Graphik ist die therapeutische Reichweite mit R_{th} beschriftet. Die praktische Reichweite R_p wird heute nicht mehr für Berechnungen herangezogen. Hierfür kommt häufiger die mittlere Reichweite, welche die Tiefe angibt, in der 50% von $D_{\max}$ appliziert werden, zum Einsatz. Der Bremsstrahlenuntergrund ist als Ausläufer mit BSA eingezeichnet.

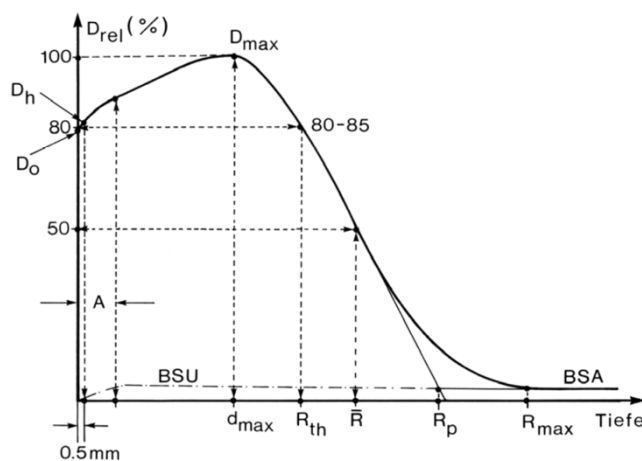


Abb. 4: Größen zur Beschreibung von Elektronentiefendosiskurven

2 Messungen im Wasserphantom

Das Wasserphantom wird wie in den vorherigen Dosimetriestunden aufgebaut und ausgerichtet. Als Besonderheit für den Elektronenbetrieb wird ein Tubus am Strahlerkopf angebracht (offene Bauform, siehe Abb. 5). Die Feldbegrenzung erfolgt durch den Endrahmen des Tubus, welcher aus 1cm Blei besteht. Der Fokus-Oberflächenabstand wird auf 95cm eingestellt um eine Aufstreuung der Elektronen in Luft möglichst gering zu halten. Als Messkammer kommt eine Flachkammer (Roos, 200V) zum Einsatz.

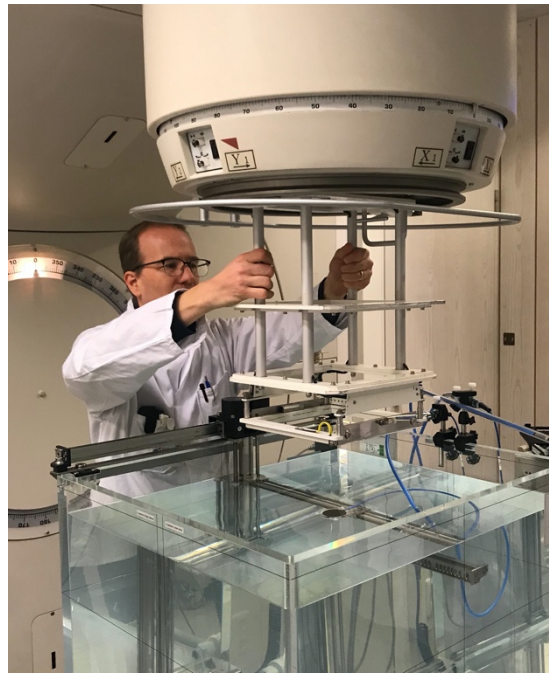


Abb.5: Anbringung eines Tubus am Strahlerkopf (Elektronenbetrieb)

Nach dem Eintragen ins Bestrahlungsbuch, sowie der Durchführung des „Check of Beam Center“ können die ersten Messungen aus der heutigen Versuchsreihe gestartet werden.

2.1 Vergleich der Tiefendosiskurven für verschiedene Elektronenenergien

Es werden nacheinander Tiefendosiskurven für alle wählbaren Elektronenenergien gemessen, d.h. für 4 MeV, 6 MeV, 8 MeV, 10 MeV, 12MeV und 15 MeV. Wegen der geringen Reichweite der Elektronen bei 4 MeV und 6 MeV muss auf „high resolution“ umgestellt werden um eine aussagekräftige Tiefendosiskurve abbilden zu können.

Das Diagramm in Abbildung 6 zeigt den Verlauf der Tiefendosiskurven für die einzelnen Energien. Hierbei ist ersichtlich, dass die Kurven für alle Energien ansteigen bis sie ihr $D_{\max}$ erreicht haben und anschließend unterschiedlich steil abfallen. Der Dosisaufbau kann bei den Elektronen jedoch nicht durch den Aufbaueffekt, wie er von Photonenstrahlung bekannt ist, erklärt werden. Die Ursache für den Anstieg der Dosis in der Tiefe ist die Streuung der Elektronen. Die einzelnen Elektronen wechselwirken mit Materie und werden von ihrer Flugbahn abgelenkt bis zur nächsten Wechselwirkung. Sie platzen bei jeder Wechselwirkung einen Teil ihrer Energie, bis sie im $D_{\max}$ angelangt sind.

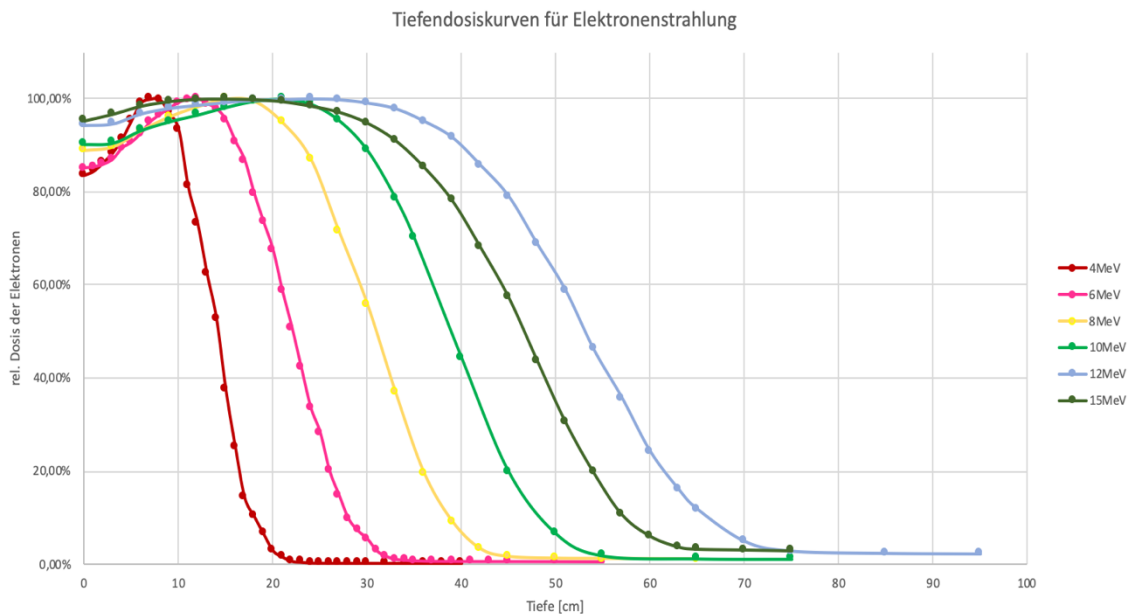


Abb. 6: Tiefendosiskurven für 4, 6, 8, 10, 12 und 15 MeV Elektronenstrahlung

Des Weiteren kann aus der Graphik abgeleitet werden, dass sich das $D_{\max}$ mit zunehmender Strahlenenergie in die Tiefe verschiebt, dass die Reichweite der Elektronen also steigt. Das $D_{\max}$ verschiebt sich allerdings nicht nur, sondern flacht auch zu einem Plateau ab. Dies lässt sich dadurch erklären, dass höherenergetische Elektronen weniger stark von ihrer Flugbahn abgelenkt werden und die maximale Energieabgabe erst am Ende erfolgt. Mit der Erhöhung der Energie der Elektronenstrahlung steigt auch die Strahlenbelastung der Haut.

2.2 Vergleich verschiedener Messkammern bei Elektronenstrahlung

In diesem Schritt wurden die gemessenen Tiefendosiskurven der Rooskammer mit Messungen einer Kompaktkammer verglichen. Als Kompaktkammer kam die Semiflex 0,125 cm³ zum Einsatz. Es wurden sowohl mit der niedrigsten Strahlenenergie (4 MeV), als auch mit der maximalen Energie von 15 MeV Messungen durchgeführt.

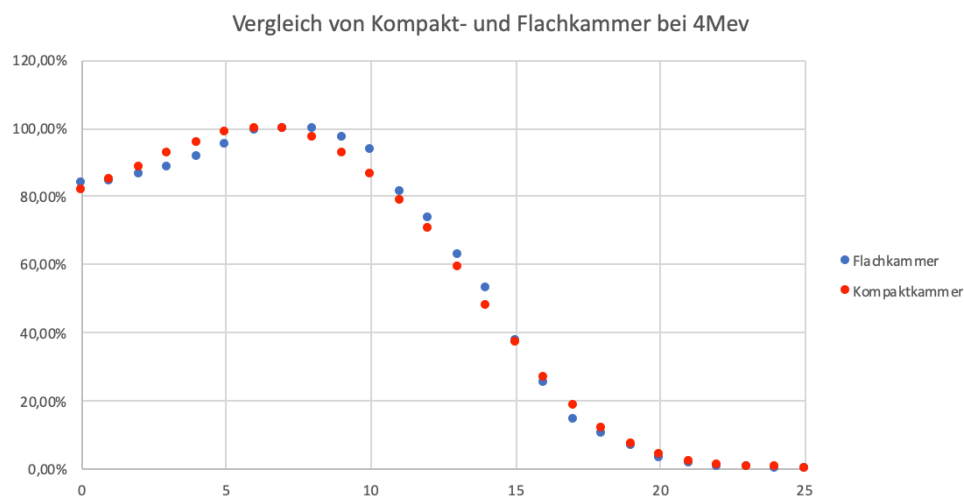


Abb. 7: Tiefendosiskurven für 4 MeV Elektronenstrahlung gemessen mit einer Flachkammer (blau) und einer Kompaktkammer (rot)

Abbildung 7 zeigt den Verlauf der Tiefendosiskurven für 4 MeV Strahlenenergie, Abbildung 8 für 15 MeV. Vergleicht man den Kurvenverlauf bei 4 MeV Elektronenenergie, so fallen geringe Abweichungen im Aufbaubereich, als auch im Dosisabfall auf. Beim Betrachten der beiden Kurven bei 15 MeV hingegen, stimmen die Messwerte von Kompaktkammer und Flachkammer nahezu überein. Diese vier Messungen veranschaulichen weshalb in DIN 6800-2 Kompaktkammern nur für Messungen ab 10 MeV empfohlen werden, und im unteren Energiebereich Flachkammern vorzuziehen ist. Sie haben in der Tiefe eine bessere Auflösung.

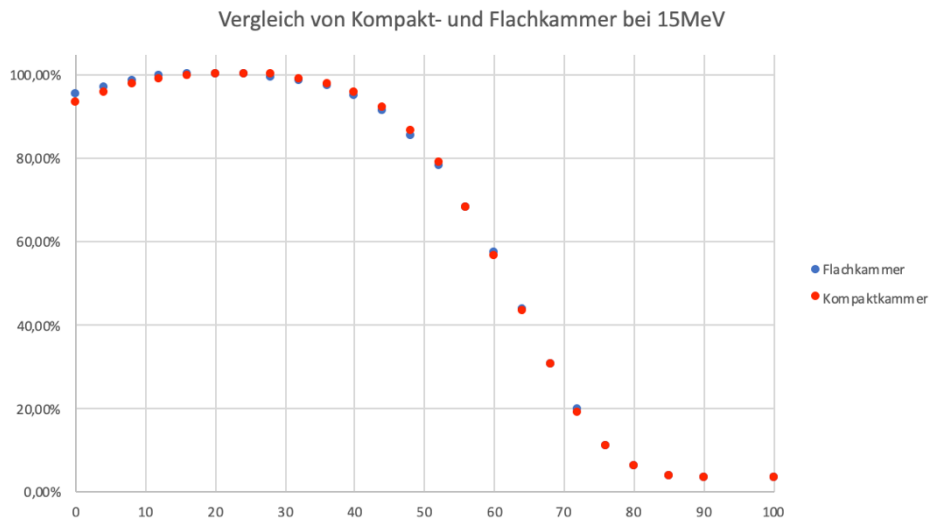


Abb. 8: Tiefendosiskurven für 15 MeV Elektronenstrahlung gemessen mit einer Flachkammer (blau) und einer Kompaktkammer (rot)

2.3 Vergleich verschiedener Tubus Bauformen

Eine weitere Aufgabe im Praktikum war der Vergleich der verschiedenen Tubus Bauformen miteinander. Die bisherigen Messungen wurden alle mit einem offenen Tubus durchgeführt. Nachfolgend wird auf eine geschlossene Bauform gewechselt, den 5cm Rundtubus (in Abb. 3 Bauform a). Das bestrahlte Feld ist kreisförmig mit einem Durchmesser von 5cm, wobei Anpassungen auf ein kleines Feld bis 2cm möglich sind. Aufgrund des Platzmangels werden die Messungen ohne Referenzkammer durchgeführt. Die Markuskammer wäre eine geeignete kleine Flachkammer für diese Messungen, welche dieses Mal jedoch nicht zum Einsatz kommt. Für die Intention der heutigen Versuchsreihe ist die Kompaktkammer ausreichend.

Die Abbildungen 9 und 10 zeigen die Tiefendosiskurven von einem offenen Tubus und dem 5cm Rundtubus im Vergleich. Die Kurven aus Abbildung 9 wurden bei einer Elektronenenergie von 4 MeV gemessen und zeigen nur sehr geringe Unterschiede im $D_{\max}$ und im Bereich des Dosisabfalls. Bei einer Energie von 15 MeV (Abb. 10) ist die Abweichung jedoch deutlicher sichtbar. Die geschlossene Bauform zeigt einen früheren und flacheren Abfall vom Dosismaximum. Beim Rundtubus kommt es aufgrund der geschlossenen Bauform zu mehr Wechselwirkungen, das Energiespektrum verschiebt sich nach vorne und das $D_{\max}$ geringfügig zur Oberfläche hin, die Hautdosis sinkt.

Vergleich von verschiedenen Tubus Bauformen bei 4MV

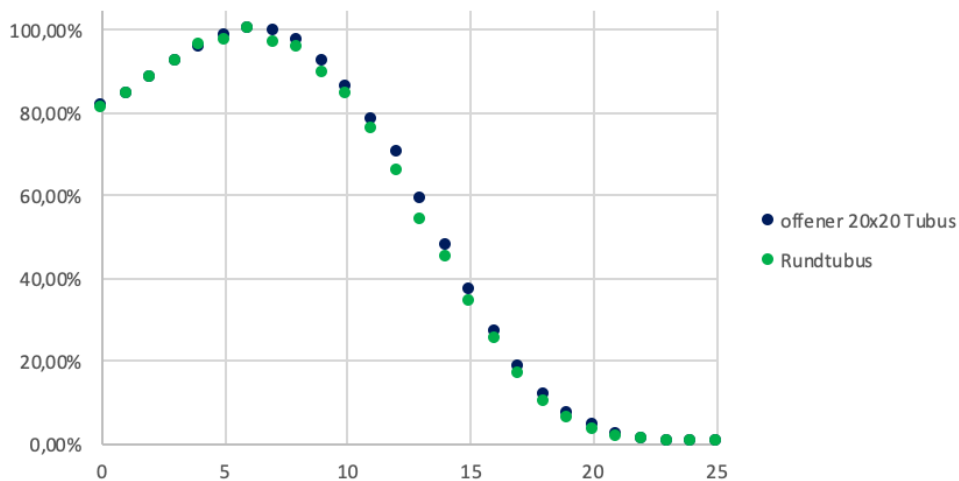


Abb. 9: Tiefendosiskurve bei 4 MeV Elektronenstrahlung mit offenem Tubus und geschlossenem Rundtubus

Vergleich von verschiedenen Tubus Bauformen bei 15 MeV

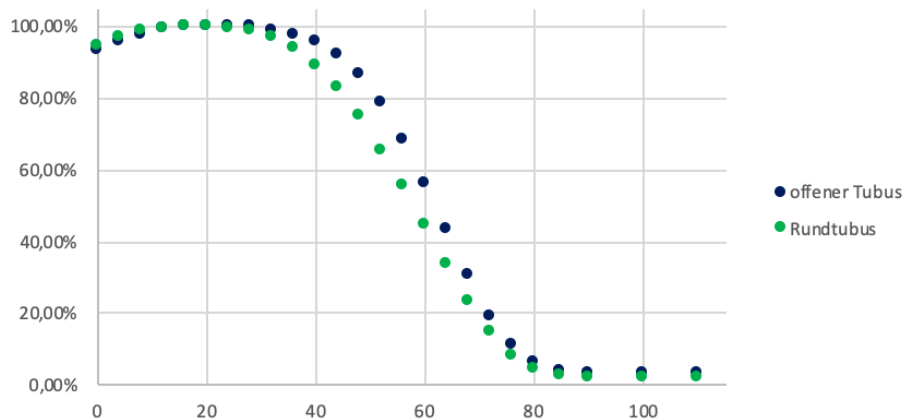


Abb. 10: Tiefendosiskurve bei 15 MeV Elektronenstrahlung mit offenem Tubus und geschlossenem Rundtubus

2.4 Dosisquerprofile bei Elektronenstrahlung

Zum Abschluss des Dosimetriepraktikums wurden Dosisquerprofile mit 8 MeV Elektronenstrahlung aufgenommen für beide Bauformen. Abbildung 11 zeigt die Dosisquerprofile für den geschlossenen Rundtubus in 16mm und 40mm Tiefe. In Abbildung 12 sind die Dosisquerprofile in 16mm und 40mm Tiefe für den offenen Tubus 20x20cm dargestellt. Aufgrund des Volumeneffekts zeigt sich ein verbreiteter Halbschatten. Der Dosisabfall ist im Vergleich zum Rundtubus steiler und weniger abgerundet. Der offene Tubus lässt mehr Wechselwirkungen mit Luft, sowie eine Streuung aus dem Tubus zu, wohingegen bei der geschlossenen Bauform Wechselwirkungen mit dem Metall stattfinden.

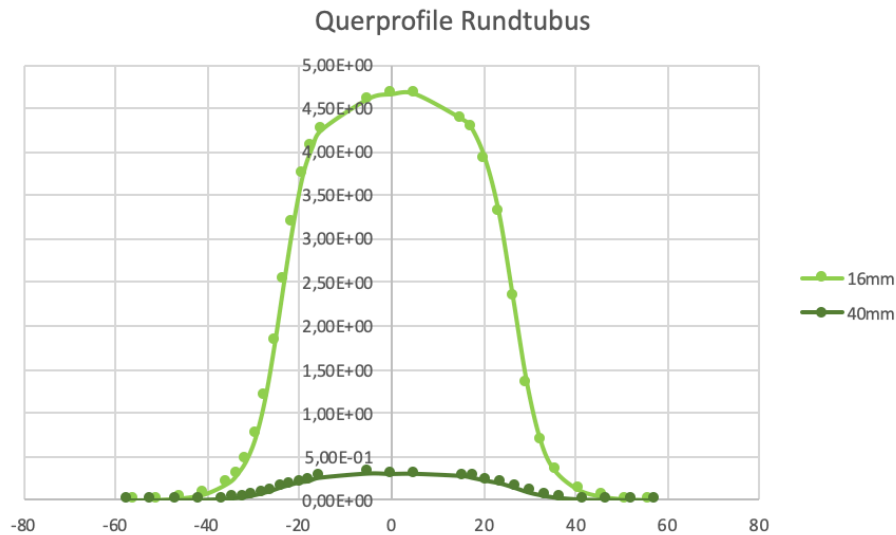


Abb. 11: Dosisquerprofil für 8 MeV Elektronenstrahlung mit geschlossenem Rundtubus

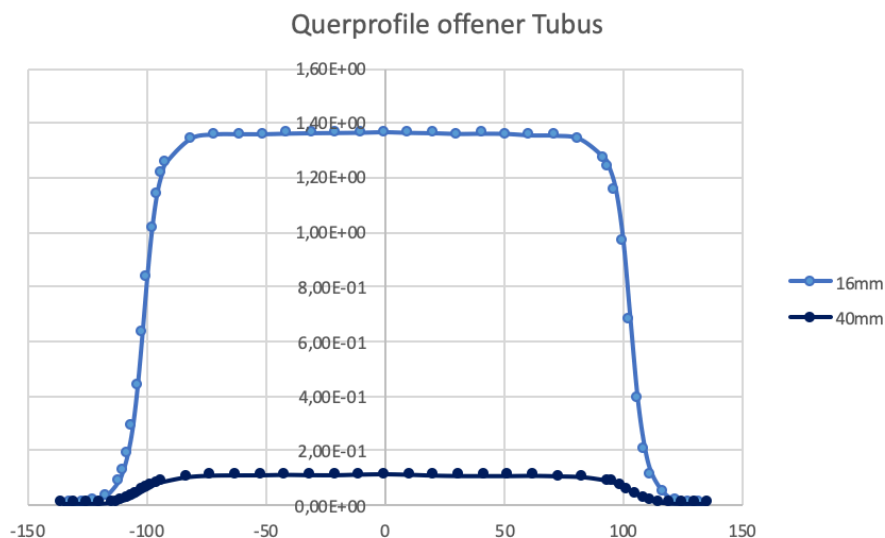


Abb. 12: Dosisquerprofil für 8 MeV Elektronenstrahlung mit offenem Tubus

3 Zusammenfassung

In diesem Praktikum haben wir gelernt wie wichtig der Einsatz eines geeigneten Tubus ist bei der Therapie mit Elektronenstrahlung. Auch die exakte Positionierung und die Vermeidung unnötig langer Wege der Elektronen durch Luft sind deutlich geworden.

Obwohl die Bestrahlung mit Elektronenstrahlung Vorteile bietet, wie eine definierte Reichweite, besserer Strahlenschutz von Risikoorganen und Schonung des umliegenden Gewebes, ist der Einsatz stark begrenzt und der Großteil der Therapien wird mit Photonenstrahlung durchgeführt. Neben der kurzen Reichweite, die bei tiefliegenden Tumoren nicht ausreichend ist, kann auch der hohe messtechnische Aufwand genannt werden.

4 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