



Messung von Tiefendosiskurven und Querprofilen bei Elektronenstrahlung

BM6 Dosimetrie

Am 30.11.2018

Dozent: Dr. Oliver Dohm

Protokoll: Maximilian Doriat

Inhalt

Abbildungen	3
1. Theoretische Grundlagen.....	4
1.1 Erzeugung und Glättung des Elektronenstrahls	4
1.2. Kollimation des Elektronenstrahls.....	5
1.3. Reichweiten von Elektronenstrahlung	7
2. Messungen im Wasserphantom	8
2.1. Messung mit dem 20x20 cm Tubus	8
2.2. Messungen mit dem 5 cm Rundtubus.....	13
3. Zusammenfassung und Ausblick auf die Praxis	15
4. Quellen	16

Abbildungen

Abbildung 1: Strahlerkopf eines Linearbeschleunigers im Elektronenbetrieb	4
Abbildung 2: Sekundäre Streufoliensysteme	5
Abbildung 3: Verschieden Bauformen von Elektronentubussen	6
Abbildung 4: Reichweiten von Elektronenstrahlung	7
Abbildung 5: Messung mit 20x20 cm Tubus und Roos-Kammer	8
Abbildung 6: Tiefenionendosiskurven gemessen mit Roos-Kammer bei 20x20 cm Tubus	9
Abbildung 7: Dosisanstieg durch Streuung der Elektronen	10
Abbildung 8: Vergleich von Tiefenionendosis- und Tiefendosiskurven	11
Abbildung 9: Vergleich der Tiefendosiskurven gemessen mit Flachkammer und Kompaktkammer	12
Abbildung 10: Querprofile beim 20x20 cm Tubus	12
Abbildung 11: Messung mit 5 cm Rundtubus	13
Abbildung 12: Vergleich der Tiefendosiskurven zwischen 20x20 cm Tubus und 5 cm Rundtubus	14
Abbildung 13: Vergleich der Querprofile in 12 mm Tiefe	15

Streufoliensysteme verwendet, welche Pyramidenförmig aufgebaut sind (vgl. Abbildung 2a), um den Peak im Zentralstrahl abzuflachen.

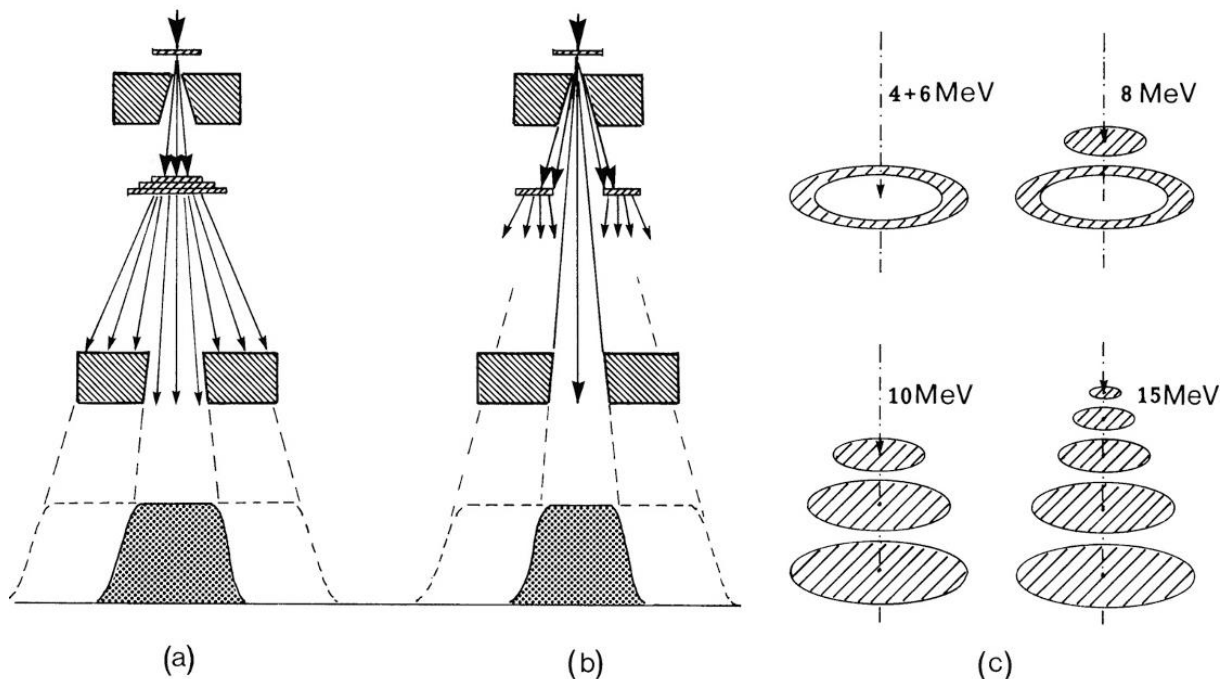


Abbildung 2: Sekundäre Streufoliensysteme

Eine Aufstreuung der Elektronen hat grundsätzlich zur Folge, dass Bremsstrahlung erzeugt wird und der Elektronenstrahl durch die Stoßbremsung an Energieschärfe verliert. Um ein optimales Verhältnis zwischen gewünschter Aufstreuung und ungewünschter Bremsstrahlerzeugung und Stoßbremsung zu erhalten, wird ein Material mit möglichst hoher Ordnungszahl für die Streufolien verwendet.

1.2. Kollimation des Elektronenstrahls

Die Kollimation des Bestrahlungsfeldes erfolgt im Elektronenbetrieb über mehrere Stufen. Primär wird das Feld mit den gleichen Kollimatoren wie beim Photonenbetrieb vorgeformt. Die erste Stufe stellt ein unveränderlicher Primärkollimator zwischen erster und zweiter Streufolie dar. Dieser legt die maximale Größe des Strahlungsfeldes fest. Die zweite Stufe der Kollimation ergibt sich durch die vier Blockblenden (in Abbildung 1 als X und Y bezeichnet), je zwei in X- und Y-Richtung. Diese Blockblenden befinden sich vor dem Austrittsfenster am Strahlerkopf. Sie werden für die grobe Abgrenzung des Strahlenfeldes je nach gewünschter Größe gewählt. Allerdings begrenzen die Blenden ein wesentlich größeres Feld als schlussendlich gewünscht. So werden die Blenden bei einem gewünschten 20x20 cm Feld für 4 MeV Elektronen auf 31x33 cm Feldgröße positioniert, um mit der 3. Stufe der Kollimation zusammen ein homogenes Feld zu erzeugen. Diese Blendeneinstellungen sind spezifisch für jede Energie und jede Feldgröße. Diese Einstellungen müssen jährlich überprüft werden. Für

die weitere Kollimation werden nicht die Leafs, wie im Photonenbetrieb, sondern ein sogenannter Elektronentubus verwendet. Die Begrenzung des Strahlenfeldes bei Elektronen sollte so nahe wie möglich am Patienten erfolgen. Der Grund dafür sind die Wechselwirkungen, durch welche die Elektronen in der Luft erneut aufgestreut werden. Dadurch erweitert sich das Strahlenfeld über die gewünschte Breite hinaus. Deswegen werden die Tubusse unter dem Strahlerkopf eingehängt (vgl. Abbildung 5) und anschließend die Bestrahlung soweit möglich auf Kontakt mit dem Tubus durchgeführt. Es werden drei verschiedene Bauformen von Elektronentubussen unterschieden.

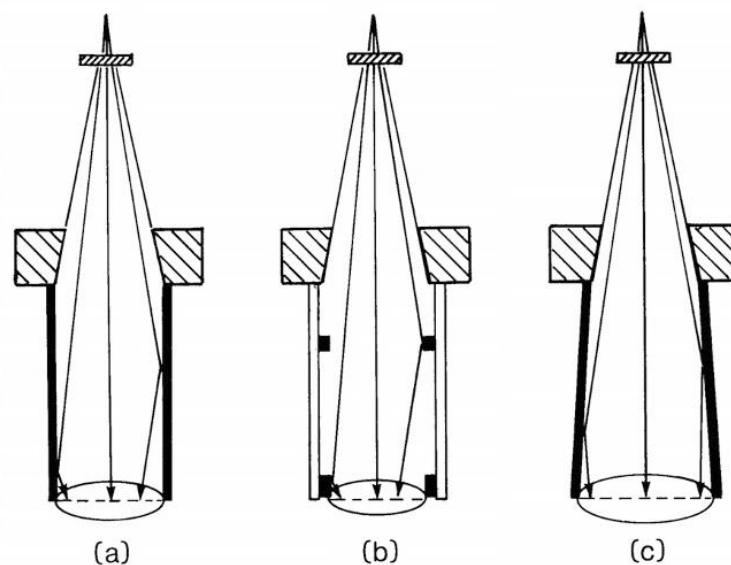


Abbildung 3: Verschieden Bauformen von Elektronentubussen

Im Praktikum werden ein offener Leichtmetalltubus mit Bleieinsätzen mit Feldgröße 20x20 cm (Abbildung 3 Bauform b) und ein paralleler runder Schwermetalltubus mit einem Feld-Durchmesser von 5cm (Abbildung 3 Bauform a) verwendet. Für kleinere Felder können die Tubusse mit verschiedenen Endrahmen ausgestattet werden, welche die endgültige Form und Größe des Feldes festlegen. Diese befinden sich am Ende des Tubusses und sind entsprechend der Divergenz des Feldes fokussierend ausgeführt. Neben der Begrenzung des Strahlenfeldes wird der Tubus dazu verwendet, das Querprofil des Feldes zu optimieren. Ohne den Tubus erhält man eine gaußförmige Dosisverteilung im Querprofil des Feldes. Durch die Feldbegrenzungen der Bleieinsätze bzw. die Schwermetallwände werden die Elektronen zum Teil wieder zurück in das Feld gestreut. Diese Streuelekttronen füllen die Enden des Feldes auf und führen zu einem annähernd planaren Dosisverlauf im Bestrahlungsfeld.

Individuelle Feldformen können mithilfe von gegossenen Bleiabschirmungen oder Bleigummis gestaltet werden. Diese werden direkt auf dem Patienten platziert.

1.3. Reichweiten von Elektronenstrahlung

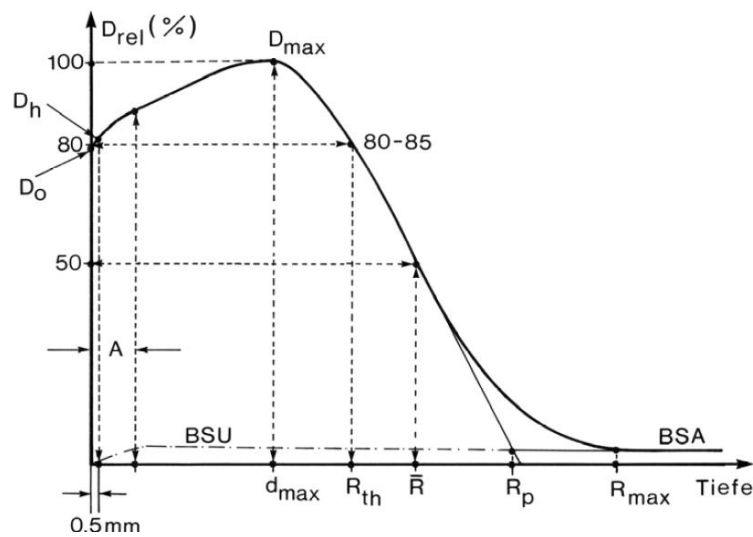


Abbildung 4: Reichweiten von Elektronenstrahlung

Beim Vergleich von Tiefendosiskurven von Elektronen werden bestimmte Begriffe verwendet, welche die Reichweite von Elektronen betrifft. Abbildung 4 zeigt exemplarisch eine Tiefendosiskurve für Elektronen mit den entsprechend verwendeten Begriffen für deren Reichweite. Folgende wichtige Begriffe daraus sollen hier erläutert werden:

- $d_{\max}$ Tiefe des Dosismaximums
- R_{th} Therapeutische Reichweite = Tiefe in der noch 80 % der Maximaldosis ankommen
- $\bar{R}$ Mittlere Reichweite = Tiefe in der noch 50 % der Maximaldosis ankommen
- R_p Praktische Reichweite = Schnittpunkt der Tangente und dem Bremsstrahlungsausläufer (BSU)
- $R_{\max}$ Maximale Reichweite = Tiefe in der die Tiefendosiskurve in den Bremsstrahlungsausläufer (BSA) übergeht.

2. Messungen im Wasserphantom

Entsprechend der vorhergehenden Protokolle wurde das Wasserphantom aufgebaut und relativ zum Linearbeschleuniger ausgerichtet. Anschließend wurde die Funktion und der Aufbau der beiden verwendeten Tubusse erklärt.

2.1. Messung mit dem 20x20 cm Tubus

Für die ersten Messungen wird der 20x20 cm Tubus verwendet, welcher auch der größte Tubus für diesen Linearbeschleuniger darstellt.

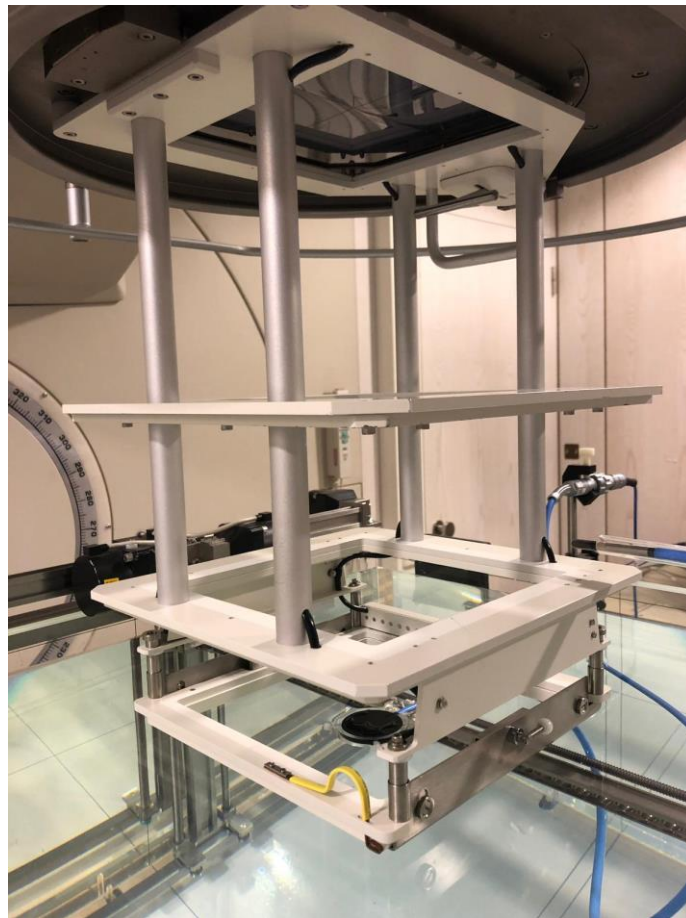


Abbildung 5: Messung mit 20x20 cm Tubus und Roos-Kammer

Nach dem Aufbau des Wasserphantoms wurde eine Roos-Kammer (Flachkammer) als Messkammer auf der Mechanik des Wasserphantoms befestigt. Fährt die Flachkammer in den Nullpunkt, kann man gut erkennen, dass sie leicht über die Wasseroberfläche hinausragt, da der Bezugspunkt von Flachkammern mittig an der Innenseite des Eintrittsfensters liegt. Als Fokus-Oberflächen-Abstand werden im Normalfall 95 cm gewählt, was genau erreicht wird, wenn das Ende des Tubusses auf der Wasseroberfläche liegt. Um Beschädigungen durch eventuelle Fehlbedienung zu vermeiden, wird der Tubus so platziert, dass die Messkammer unter dem Tubus hindurchfahren kann, ohne Schaden zu nehmen. Als Referenzkammer für die Messungen mit dem 20x20 cm Tubusses wird die 0,3 cm³ Semiflex-Kammer (Kompaktkammer) verwendet. Diese wird am Tubus oberhalb einer der Bleieinsätze platziert,

wo sie die Schwankungen des Beschleunigers detektieren kann, aber die Dosis im Feld selbst nicht beeinflusst.

Nach dem „Check of Beam center“ wurden je eine Tiefendosiskurve für die maximalen Elektronenenergien von 4, 6, 8, 10, 12 und 15 MeV aufgenommen. Dabei ist zu beachten, dass aufgrund der geringen Reichweiten der Elektronen mit 4 und 6 MeV, deren Tiefendosiskurven mit hoher Auflösung (high resolution) aufgenommen werden müssen. Die Ergebnisse sind in Abbildung 6 dargestellt.

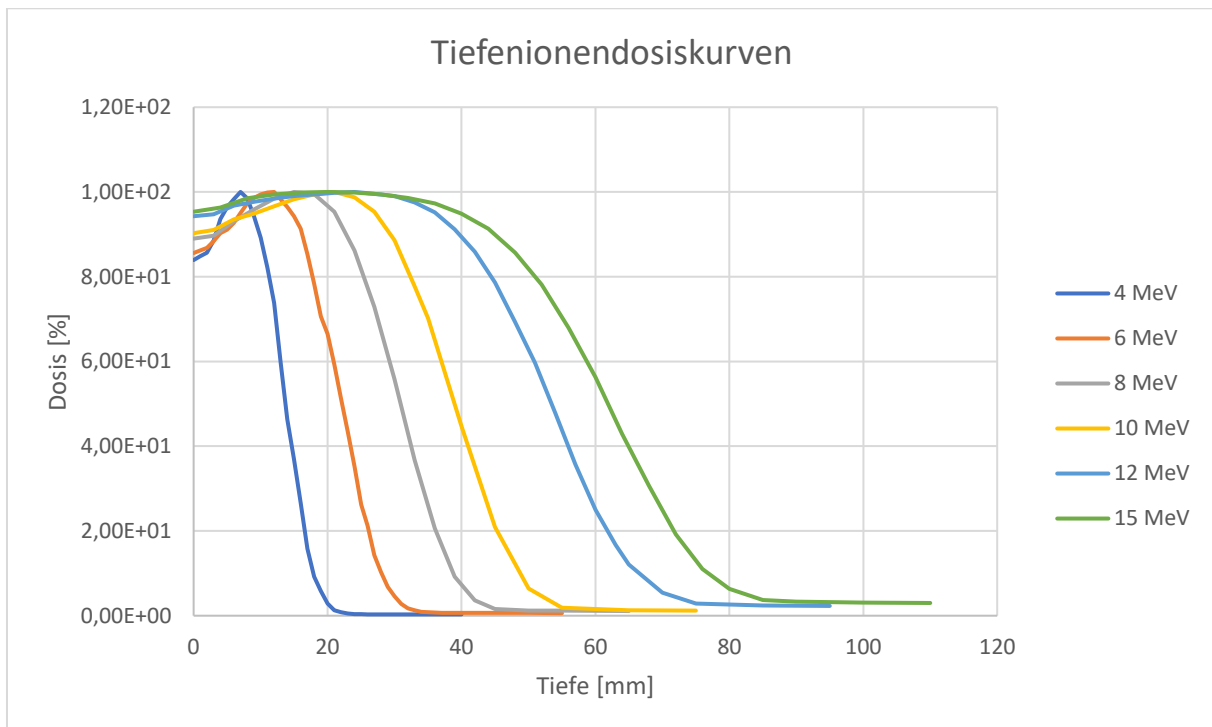


Abbildung 6: Tiefenionendosiskurven gemessen mit Roos-Kammer bei 20x20 cm Tubus

Aus den Tiefendosiskurven der verschiedenen Energien lassen sich folgende Beobachtungen ableiten.

Bis zum Dosismaximum steigen alle Kurven an. Dies geschieht nicht, wie bei den Photonen durch einen Dosisaufbaueffekt, sondern durch die Streuung der Elektronen. Vereinfacht gesagt, wechselwirkt jedes Elektron nach einer gewissen Flugbahn erneut mit Materie. Wird das Elektron durch diese Wechselwirkungen von ihrer ursprünglichen Bahn (entlang der x-Achse) abgelenkt, legt es bei der gleichen Flugstrecke in X-Richtung weniger Weg zurück. Bei jeder weiteren Wechselwirkung steigt diese Aufstreuung, bis es zur freien Diffusion am Dosismaximum kommt und durch weitere Streuung keine Steigerung der Dosis mehr erreicht wird (vgl. Abbildung 7).

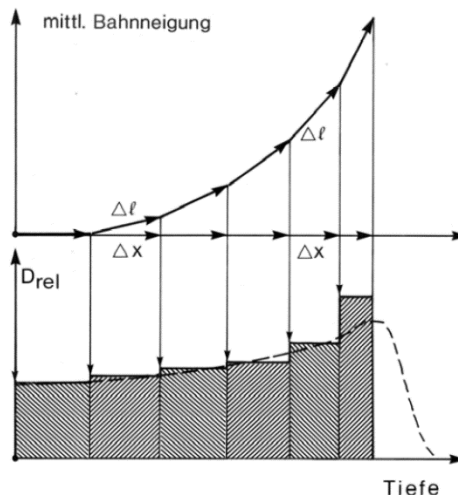


Abbildung 7: Dosisanstieg durch Streuung der Elektronen

Mit zunehmender Energie steigt auch die Reichweite der Elektronen im Wasserphantom. Das ist damit zu erklären, dass die Elektronen in ihren Wechselwirkungen unabhängig von ihrer Anfangsenergie nur geringe Mengen an Energie verlieren. Das heißt, je mehr Energie sie am Anfang ihrer Wegstrecke haben, desto mehr Wechselwirkungen können sie eingehen. Dementsprechend steigt die Reichweite der Elektronen mit zunehmender Energie, was mit den Messungen bestätigt werden konnte.

Mit zunehmender Energie steigt der Bremsstrahlungsuntergrund. Es verschiebt sich das Verhältnis von Stoßbremsvermögen und Strahlungsbremsvermögen von Elektronen.

$$\frac{S_{rad}}{S_{col}} = \frac{E \cdot Z}{800} \quad (1)$$

Dieses Verhältnis lässt sich mit der Formel 1 näherungsweise abschätzen. Die Formel zeigt, dass bei zunehmender Energie das Strahlungsbremsvermögen ansteigt und damit mehr Bremsstrahlung verursacht wird, welche die Ursache für den Bremsstrahlungsuntergrund ist.

Mit zunehmender Energie flacht das Dosismaximum ab und wird mehr zu einem Plateau. Zusätzlich steigt die relative Oberflächendosis mit zunehmender Energie an. Beide Effekte können damit begründet werden, dass die Elektronen mit höherer Energie mehr in Flugrichtung nach vorne, als zur Seite gestreut werden. Somit ist der Anstieg von Oberflächendosis zum Dosismaximum bei hohen Energien nicht so ausgeprägt. Die Dosis bleibt dann über eine längere Strecke annähernd konstant, da die hochenergetischen Elektronen nur wenig Energie verlieren und sich somit die Wechselwirkungen nicht verändern. Dadurch entsteht immer mehr ein Plateau am Dosismaximum.

Mit der verwendeten Messkammer kann nur die Ionendosis in Wasser gemessen werden. Um vergleichbare Werte zu erhalten, müssen alle gemessenen Werte in Energiedosis umgerechnet werden. Bei Photonen ist diese Korrektur nicht vorzunehmen. Bei den Elektronen verändert sich allerdings das Energiespektrum mit der Tiefe im Wasser. Dies hat auch direkt Einfluss auf das Stoß- und Strahlungsbremsvermögen. Diese Einflüsse müssen

korrigiert werden. In der verwendeten Software gibt es dafür einen Algorithmus, der diese Rechnung vornimmt.

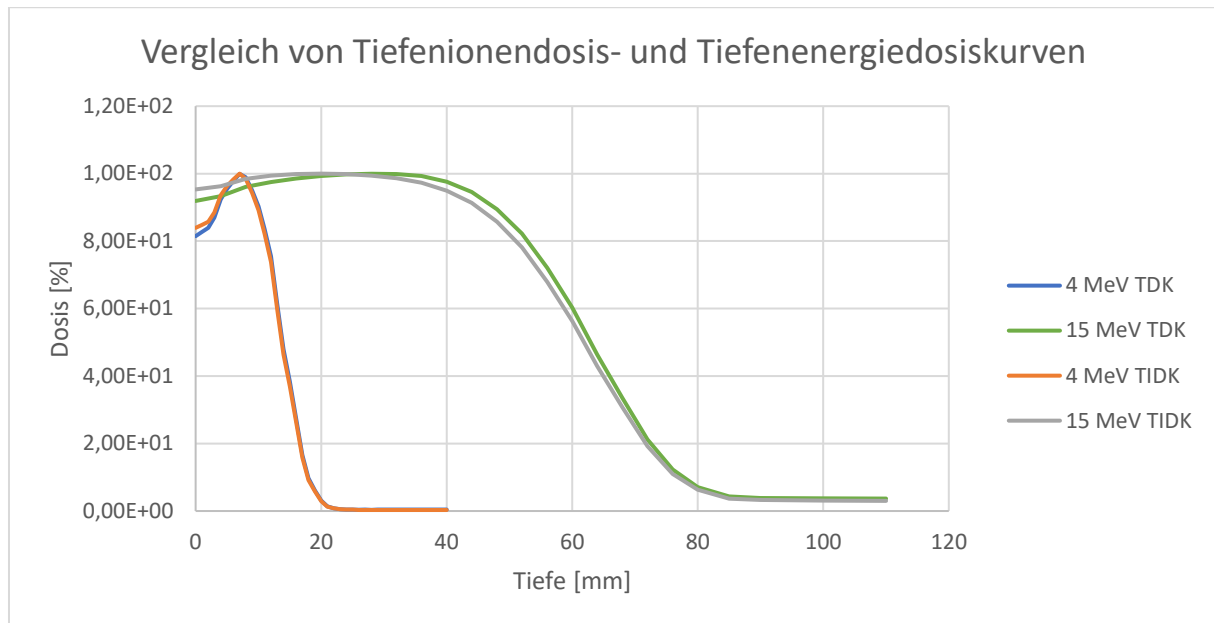


Abbildung 8: Vergleich von Tiefenionendosis- und Tiefendosiskurven

Abbildung 8 zeigt am Beispiel der Energien 4 und 15 MeV die Unterschiede zwischen Tiefenionendosiskurven und Tiefenenergiedosiskurven. Die 15 MeV Kurven unterscheiden sich deutlicher voneinander, als die 4 MeV Kurven. Der Grund dafür ist, dass bei den 15 MeV in größeren Tiefen gemessen wurde und deswegen eine höhere Differenz der Bremsvermögen entsteht. Für alle weiteren Vergleiche und Diagramme in diesem Protokoll wurden die Tiefenenergiedosiskurven verwendet.

Anschließend wurden dieselben Messungen mit der Semiflex 0,125 cm³ Kompaktkammer durchgeführt. Bei Umbau muss darauf geachtet werden, dass die Befestigungsschrauben der Kompaktkammer nicht mit dem Endrahmen des Tubus kollidieren können. In Abbildung 9 wurden exemplarisch die Tiefendosiskurven für 4 und 15 MeV Elektronenenergien, gemessen mit der Flachkammer und der Kompaktkammer, aufgetragen. Aus den Kurvenverläufen wird deutlich, dass vor allem bei 15 MeV sich keine Unterschiede zwischen den Messkammern ergeben. Bei den Kurvenverläufen der 4 MeV Energie sind leichte Unterschiede im Dosisaufbau und beim Abfall in der Tiefe zu erahnen. So weit möglich sollte für die Messung von Tiefendosiskurven bei Elektronen Flachkammern verwendet werden. Allerdings ist ab Elektronenenergien von ca. 10 MeV auch die Messung mit Kompaktkammern zulässig. Die Tiefendosisverläufe aus dem Praktikum bestätigen dies.

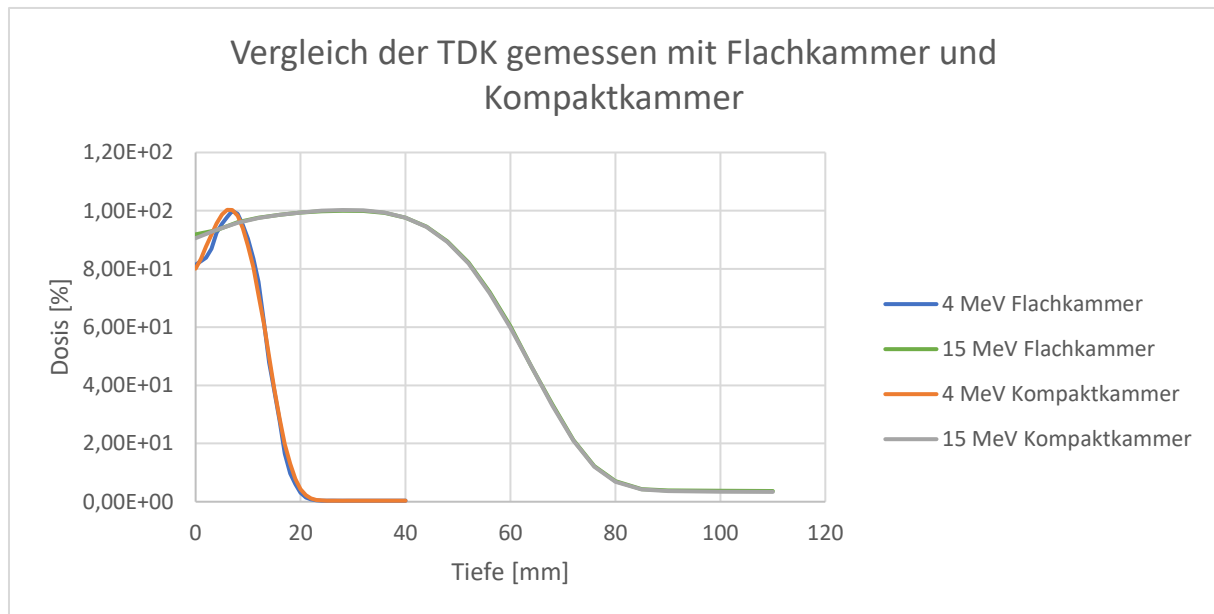


Abbildung 9: Vergleich der Tiefendosiskurven gemessen mit Flachkammer und Kompaktkammer

Mit der Kompaktkammer wurden nun auch Querprofile des Feldes bei 6 MeV Elektronenenergie aufgenommen. Die beiden Querprofile wurden in 12 mm und 30 mm Tiefe crossplane-Richtung aufgenommen. Die Verläufe der Querprofile sind in Abbildung 10 dargestellt.

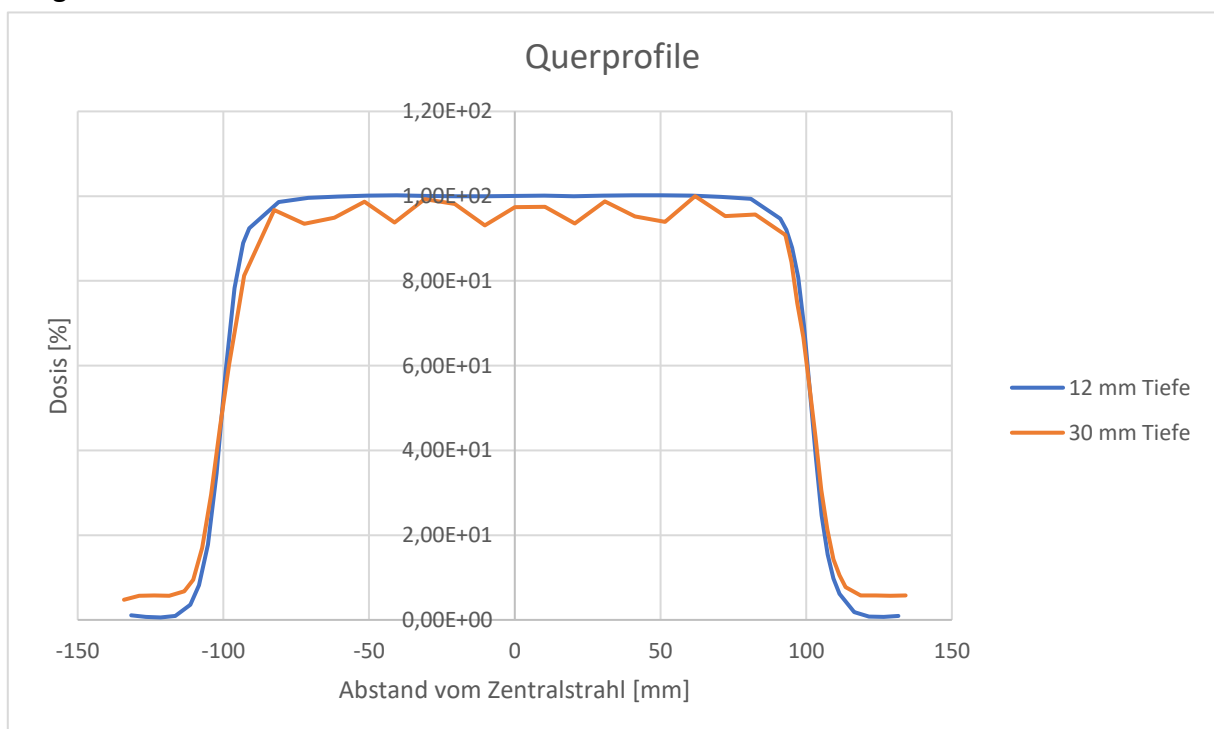


Abbildung 10: Querprofile beim 20x20 cm Tubus

Die Querprofile in den beiden Tiefen wurden jeweils auf das Maximum im Zentralstrahl normiert. In 30 mm Tiefe ist das Querprofil im Feld durch Untergrundrauschen deutlich gestört, da die nominelle Dosis in der Tiefe im Gegensatz zum Maximum bei 12 mm deutlich geringer ist (Vgl. Tiefendosisverlauf für 6 MeV). Dies zeigt, dass die Elektronen in 30 mm Tiefe

schon viele Wechselwirkungen eingegangen sind. Trotzdem ist keine wesentliche Verbreiterung des Feldes erkennbar.

2.2. Messungen mit dem 5 cm Rundtubus

Für die folgenden Messungen wurde der 20x20 cm Tubus entfernt und durch einen 5 cm Rundtubus ersetzt (Vgl. Abbildung 11). Auch dieser Rundtubus kann mit verschiedenen Aufsätzen versehen werden, um das Feld am Ende vom Tubus weiter zu begrenzen. Das kleinste damit zu erreichende Feld ist ein rundes Feld mit 2 cm Durchmesser.

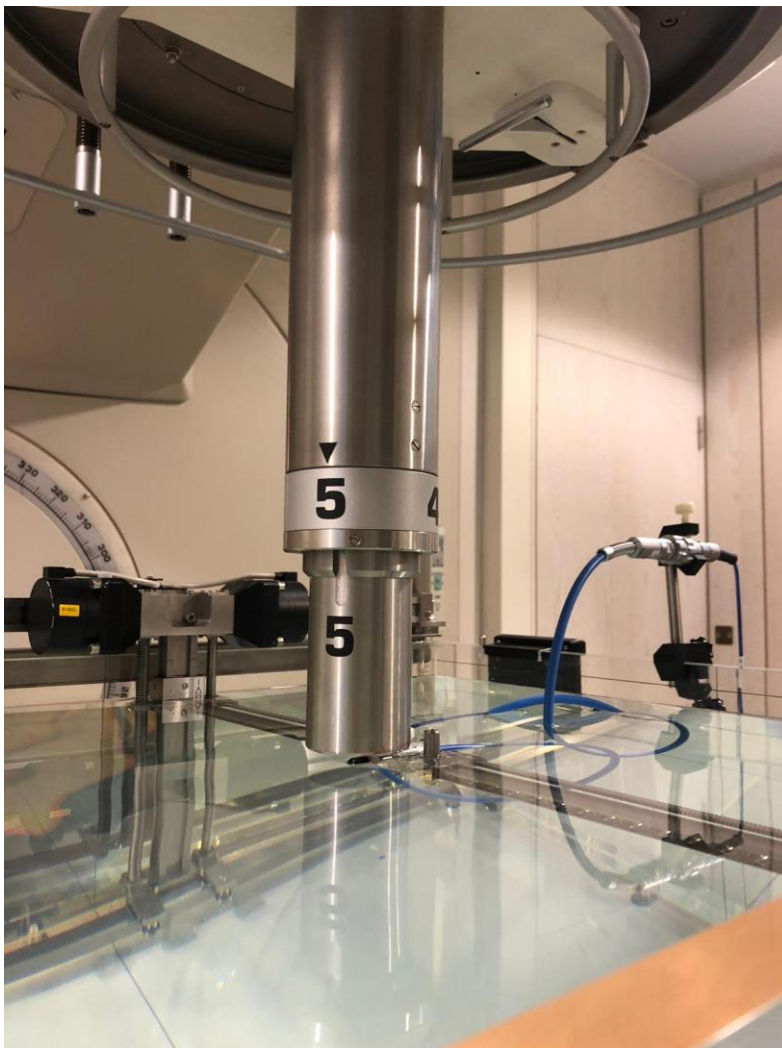


Abbildung 11: Messung mit 5 cm Rundtubus

Die Messungen sind aufgrund des kleinen Feldes und der geschlossenen Bauweise des Tubusses nicht mit einer Referenzkammer durchführbar. Dies muss beim Vergleich mit den Messungen des 20x20 cm Tubusses berücksichtigt werden. Im Idealfall misst man auch hier die Tiefendosiskurven mit einer Flachkammer. Die kleinste dafür zur Verfügung stehende ist eine Markus-Kammer. Allerdings haben die Messungen mit dem großen Tubus bereits ergeben, dass die Unterschiede zwischen Kompaktkammer und Flachkammer nur marginal sind. Für die hier durchgeführten Vergleichsmessungen ist die 0,125 cm³ Semiflex

Kompaktkammer ausreichend. Es wurden wie beim großen Tubus Tiefendosiskurven für alle zur Verfügung stehenden Energien aufgenommen.

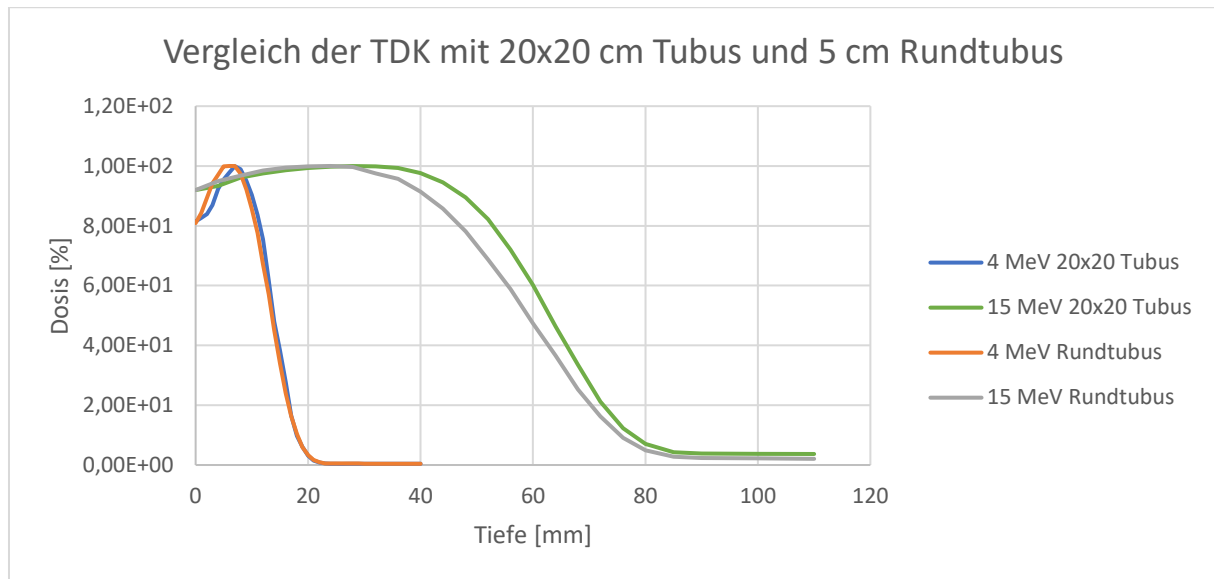


Abbildung 12: Vergleich der Tiefendosiskurven zwischen 20x20 cm Tubus und 5 cm Rundtubus

Abbildung 12 zeigt die Tiefendosiskurven für 4 MeV und 15 MeV mit 20x20 cm Tubus und 5 cm Rundtubus. Mit steigender Energie steigen die Unterschiede der Tiefendosiskurven. Dies liegt daran, dass bei der geschlossenen Bauweise des Rundtubusses mehr Streustrahlung erzeugt wird. Da dies aber bei allen Energien der Fall ist, sollten die Unterschiede der Tiefendosiskurven bei allen Energien ungefähr gleich ausgeprägt sein. Allerdings erzeugen die Elektronen mit 4 MeV Energie bereits bei Wechselwirkungen in der Luft mehr Streustrahlung, als die 15 MeV Elektronen. Das bedeutet, dass die zusätzlichen Streubeiträge durch den Rundtubus bei niedrigen Energien weniger Auswirkungen haben, als bei hohen Energien.

Die erhöhten Wechselwirkungen mit dem Rundtubus verschieben das Energiespektrum der Elektronen nach vorne. Das bedeutet, eine niedrigere Oberflächendosis, ein früheres und nicht so ausgeprägtes Dosismaximum, ein früherer Abfall der Dosiskurve und ein geringerer Bremsstrahlungsuntergrund.

Anschließend wurden mithilfe desselben Messaufbaus zwei Querprofile aufgenommen. Analog zum Querprofil des 20x20 cm Tubusses in 12 und in 30 mm Tiefe und in crossplane-Richtung mit 6 MeV Elektronenstrahlung.

Die Ergebnisse zeugen auch beim Rundtubus in 30 mm Tiefe nur eine marginale Vergrößerung des Bestrahlungsfeldes im Vergleich zu 12 mm Tiefe. Zum Vergleich der Feldform von 5 cm Rundtubus und 20x20 cm Tubus werden die beiden gemessenen Querprofile in 12 mm Tiefe auf eine Feldbreite von 2x2 normiert und in ein Diagramm geladen (vgl. Abbildung 13).

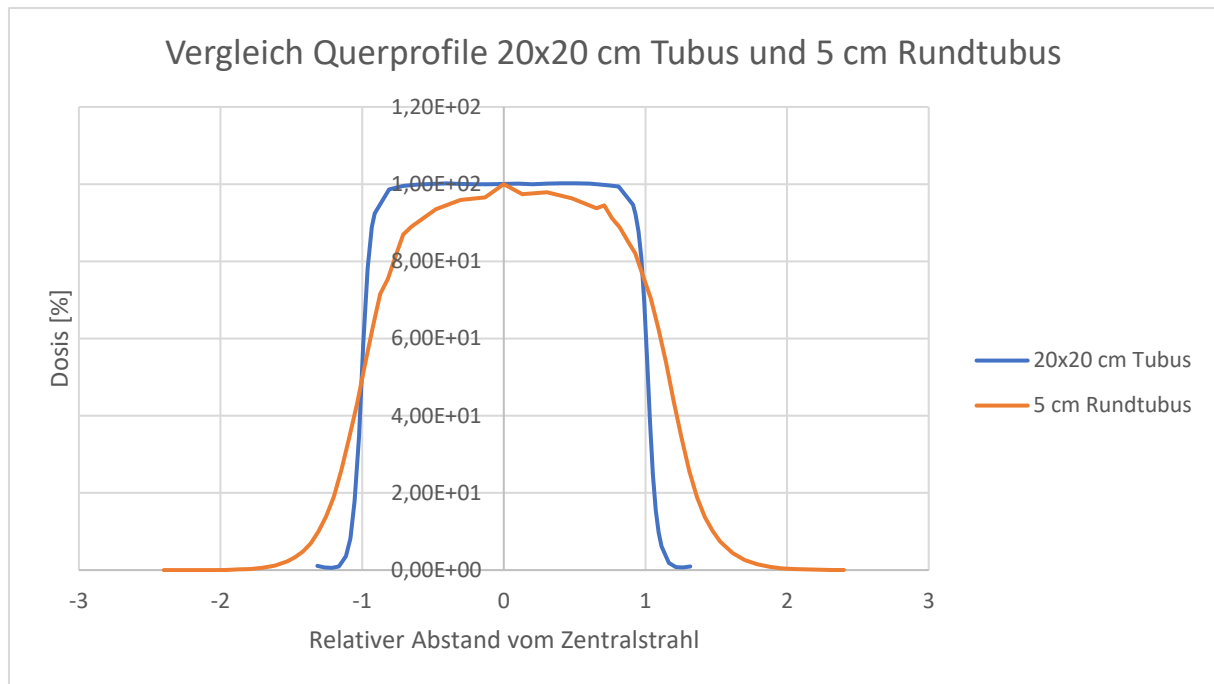


Abbildung 13: Vergleich der Querprofile in 12 mm Tiefe

Die Abbildung zeigt, dass das kleine Feld des Rundtubusses deutlich abgerundet verläuft. Ein Plateau im Feld ist nicht mehr zu erkennen. Der Grund dafür ist die Bauform des Rundtubusses. Dadurch, dass der Rundtubus keine Bleieinsätze besitzt, kann das Feld nicht scharf begrenzt werden und die Feldränder können durch die Streustrahlung nicht aufgesättigt werden. Dies führt zu deutlich ausgeprägten Halbschatten, welche sich im Zentralstrahl überlappen und somit dieses runde Querprofil zustande kommt.

3. Zusammenfassung und Ausblick auf die Praxis

Bei Bestrahlung mit Elektronen ist zur Formung eines Feldes ein Tubus einzusetzen, welcher nach Möglichkeit immer im Kontakt mit Patienten bzw. Wasserphantom positioniert wird. Dies ist notwendig, da Elektronen bereits im Strahlerkopf und auch in der Luft gestreut werden und sich dadurch eine Verbreiterung des Bestrahlungsfeldes ergibt. Ist es bei der Patientenbestrahlung nicht möglich auf Kontakt zu bestrahlen, muss diese Verbreiterung des Strahlenfeldes berücksichtigt werden und eventuell zur Abschirmung Bleigummi eingesetzt werden.

Nur ca. 5 % der Bestrahlungen in der Strahlentherapie finden mit Elektronen statt. Messtechnisch gesehen nimmt die Messung Elektronen in den verschiedenen Energien mehr als die Hälfte an Zeit in Anspruch. Trotzdem wird auf die Bestrahlung mit Elektronen nicht verzichtet, da vor allem durch den steilen Abfall der Tiefendosiskurve Zielgebiete, die nahe an der Patientenoberfläche liegen, bei guter Schonung von tiefer liegendem Gewebe bestrahlt werden können.

Bei der Bestrahlung mit kleinen Rundtubussen muss beachtet werden, dass man kein scharf abgegrenztes Feld erhält und das Dosismaximum nicht bis zum Feldrand reicht. Um trotzdem

die verschriebene Dosis im Zielgebiet platzieren zu können muss ein 1 cm größerer Tubus verwendet werden.

4. Quellen

- DIN 6800-2
- „Strahlungsmessung und Dosimetrie“ 2. Auflage, Hanno Krieger, Springer Fachmedien Wiesbaden, 2013
- „Grundlagen der Strahlungsphysik und des Strahlenschutzes“ 5. Auflage, Hanno Krieger, Springer Fachmedien Wiesbaden, 2017
- „Strahlungsquellen für Technik und Medizin“ 3. Auflage, Hanno Krieger, Springer Fachmedien Wiesbaden, 2018
- Blätterkatalog der PTW,
http://www.ptw.de/fileadmin/data/download/catalogviewer/Radiation_Medicine_Cat_en_58721100_09/blaetterkatalog/index.html#page_8, aufgerufen am 23.12.2018