

Protokoll Dosimetrie

Messungen mit Elektronenstrahlung

zum Praktikum vom 24. November 2017

Von Rebecca Matthis

Inhaltsverzeichnis

1	Eigenschaften der Elektronenstrahlung.....	2
1.1	<i>Energiespektrum</i>	2
1.2	<i>Relative Tiefendosisverläufe bei Elektronenstrahlung.....</i>	3
2	Messen mit Elektronenstrahlung	7
2.1	<i>Messung verschiedener TDV mit der Roos-Kammer.....</i>	8
2.2	<i>Messungen verschiedener TDV mit der Farmer-Kammer</i>	10
2.2.1	Vergleich der Messungen mit Roos- und Farmer-Kammer	11
2.3	<i>Messungen verschiedener TDV mit einem Rundtubus</i>	11
2.3.1	Vergleich der Messungen mit Roos-Kammer und Rundtubus	13
2.3.2	DOSE convert: Ionendosis → Wasserenergiedosis	13
3	Ausblick in die Praxis	15

1 Eigenschaften der Elektronenstrahlung

1.1 Energiespektrum

Im Idealfall erzeugt ein Elektronenstrahl ein monoenergetisches Spektrum, z.B. mit einem Mikrotron könnte ein nahezu monoenergetisches Spektrum erzeugt werden, In der Realität wird aber ein etwas verbreitertes Spektrum erzeugt.

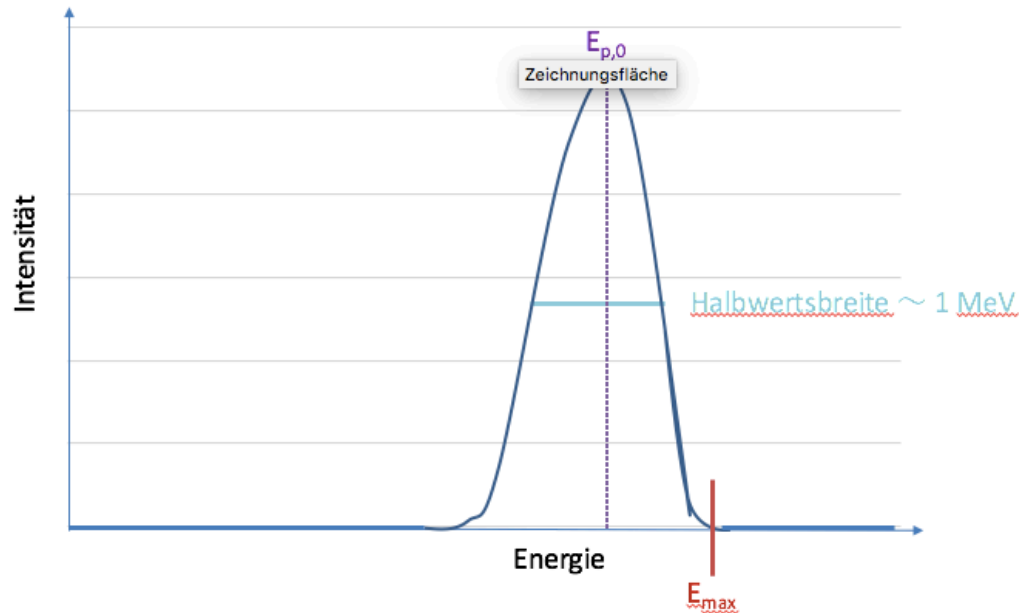


Abbildung 1: Spektrum Elektronenstrahlung

Anhand der Grafik des Spektrums kann an der Spitze des Peaks der Wert für die wahrscheinlichste Energie abgelesen werden ($E_{p,0}$). Am Ende des Peaks kann der Wert für die maximale Energie abgelesen werden, hierfür gibt es jedoch keinen ganz exakten Wert, da es keine scharfe Grenze gibt. Halbiert man den Peak, sodass rechts und links eine gleich große Fläche entsteht, kann man auch den Wert der mittleren Energie $E_{m,0}$ ermitteln.

In zunehmender Tiefe verschiebt sich das Spektrum nach links und wird breiter, sodass die Differenz zwischen $E_{p,0}$ und $E_{m,0}$ größer wird.

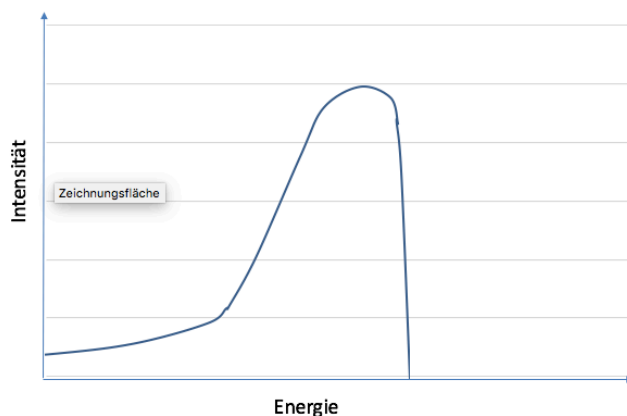


Abbildung 2: Elektronenspektrum in der Tiefe

1.2 Relative Tiefendosisverläufe bei Elektronenstrahlung

Vergleicht man relative Tiefendosisverläufe (TDV) von Photonen und Elektronen, erkennt man, dass der TDV von Elektronen eine höhere Eintrittsdosis an der Oberfläche und einen steileren Abfall nach dem Dosismaximum aufweist. Bei höheren Energien der Elektronenstrahlung verläuft der TDV am Dosismaximum etwas breiter.

Im gesamten Elektronen-TDV wird auch die Photonenstrahlung und der Bremsstrahlungshintergrund miteingerechnet. Am meisten Bremsstrahlung wird in den Streufolien erzeugt, da sie überwiegend in Vorwärtsrichtung gestreut wird, ist die Bremsstrahlung in der Mitte des Feldes am höchsten und fällt nach außen hin ab. Im TDV wird nach der Maximalen Reichweite der Elektronen nur noch der Bremsstrahlungsuntergrund aufgezeigt. R_p

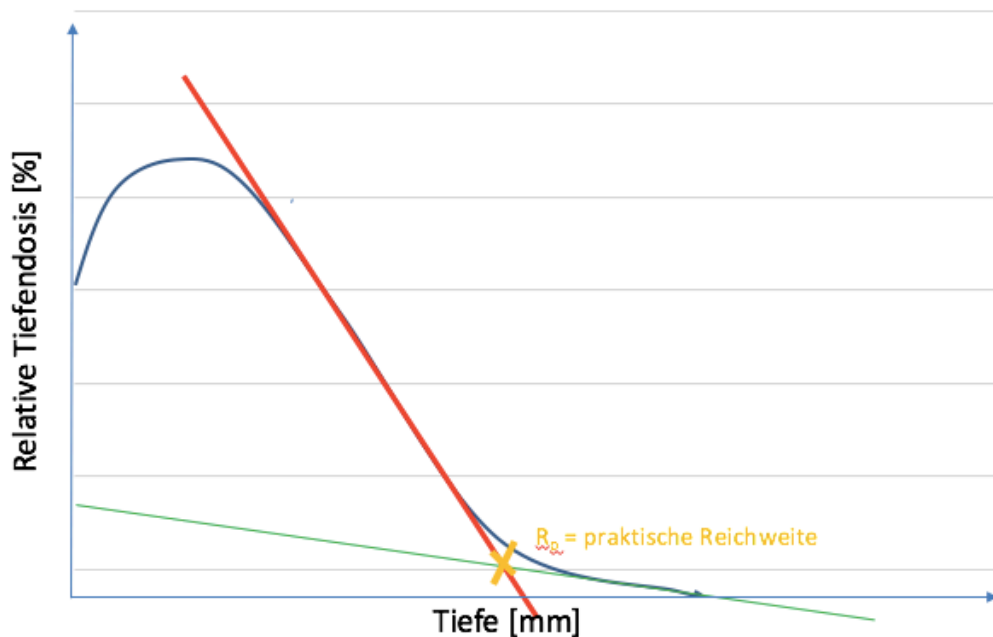


Abbildung 3: Ermittlung R_p anhand Elektronen TDV

Die praktische Reichweite R_p kann durch den Schnittpunkt einer Geraden am linearen Teil des TDV oder einer Tangente am Wendepunkt des abfallenden Tiefendosisverlaufs und einer extrapolierten Geraden des Bremsstrahlungsuntergrunds ermittelt werden. R_p gilt auch als ein Maß für die wahrscheinlichste Energie an der Oberfläche.

Weitere Parameter:

R_{100} : Tiefe des Dosismaximums

R_{50} : Reichweite, bei der 50% des Maximums erreicht wurden

→ **WICHTIG:** Bei den folgenden TDV Messungen wird immer die Ionendosis [C] gemessen!

Beziehung zwischen Wasser-Energiedosis und Luftenergiedosis:

$$D_w = D_{\text{air}} \times s_{w,a}$$

$s_{w,a}$: Massenstoßbremsverhältnis Wasser/Luft

→ $s_{w,a}$ ist abhängig von der Elektronenenergie am Messort und somit auch abhängig von der Tiefe, da sich die Elektronenenergie sich mit der Tiefe verändert

(Vergleich Photonenstrahlung: $s_{w,a} = \text{konstant}$ bei Tiefenänderungen, da das Photonspektrum in Näherungen tiefenunabhängig ist)

Der Anstieg des TDV wird bei Elektronenstrahlung nicht durch den Aufbaueffekt verursacht, da die Elektronen schon vorhanden sind, stattdessen wird der Anstieg durch den sogenannten **Aufstreueffekt** verursacht.

Betrachtet man den Energieverlust pro Wegstrecke der Elektronen bei verschiedenen Energien (Abbildung 4), erkennt man, dass die Elektronen ab einer Energie von 1 MeV kontinuierlich immer mehr Energie pro Wegstrecke verlieren. Daraus könnte man schließen, dass der TDV (ähnlich wie bei Schwerionen) wie in Abbildung 5 verlaufen müsste.

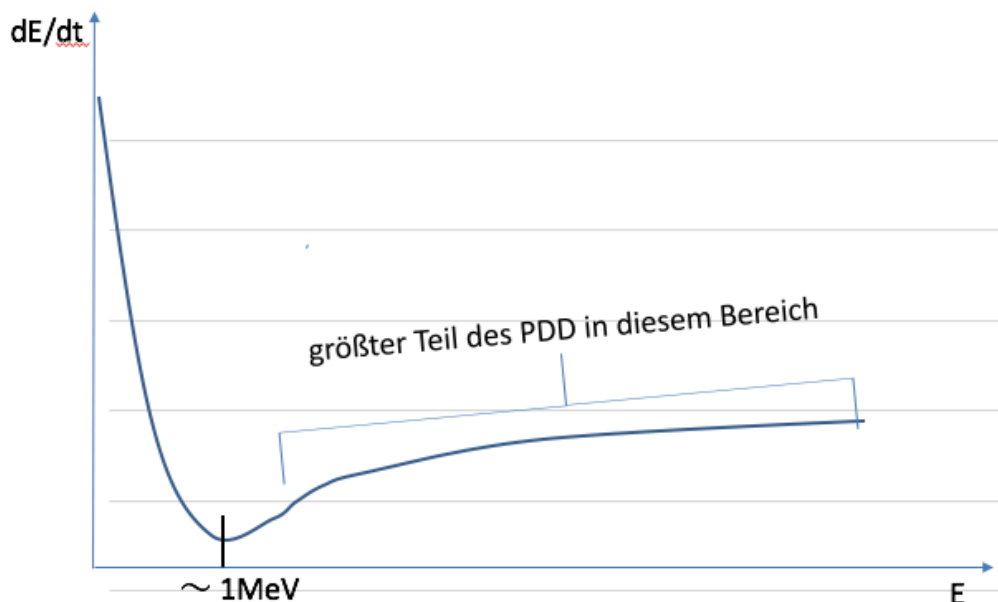
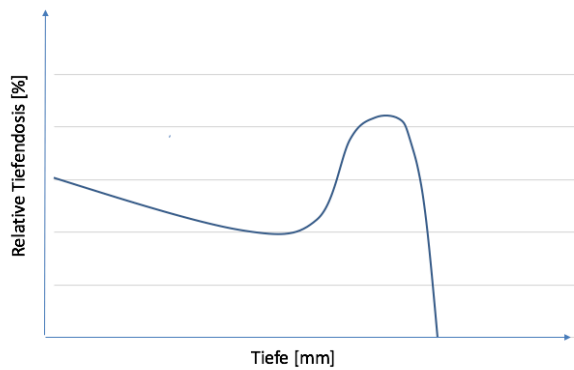


Abbildung 4: Energieverlust der Elektronen in Abhängigkeit der Energie



Im Vergleich zu Schwerionen ist die Masse der Elektronen wesentlich geringer. Daher fliegen die Elektronen, wenn sie gestreut werden eher zur Seite und es kommt direkt zur Aufstreuung sobald die Elektronen wechselwirken.

Abbildung 5: TDV abgeleitet aus Abbildung 4

Zusammenfassend kann man sagen, dass Elektronen bei Energien bis 1 MeV der Energieverlust pro Wegstrecke immer mehr ansteigt und oberhalb 1 MeV der Energieverlust pro Wegstrecke nur noch schwach ansteigt. Startet man Messungen bei hohen Elektronenenergien ist daher der Energieverlust pro Wegstrecke bis zu einer Energie von ca. 1 MeV nahezu konstant, daher spricht man bei Elektronen auch vom „continuous slowing down“.

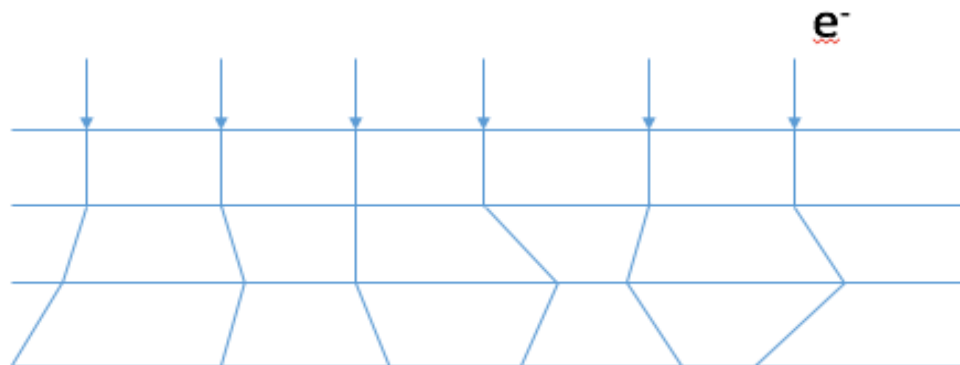


Abbildung 6: Schematische Darstellung des Aufstreuungseffekts der Elektronen

Abbildung 6 zeigt die schematische Darstellung des Aufstreuungseffekts der Elektronen; man erkennt, dass die meisten Elektronen durch die erste Schicht gerade „durchfliegen“ und ab dem Erreichen der zweiten Schicht aufgestreut werden. Aufgrund der Streuung durchdringen die Elektronen eine Schicht nicht mehr gerade, sondern schräg, dadurch verlängert sich die Wegstrecke und somit gibt das Elektron beim schrägen Durchdringen einer Schicht mehr Dosis ab. Dieser Aufstreuungseffekt wirkt sich bei niedrigen Energien größer aus, d.h. umso höhere die Energie ist, umso gerader durchdringen die Elektronen die ersten Schichten und streuen erst mit zunehmender Tiefe auf. Dadurch kommt es bei niedrigen Energien zu einem steileren Abfall des TDV nach dem Maximum, da die Elektronen sehr schnell und auch stark aufstreuen.

Eine vollständige Diffusion der Elektronen ist ab dem Punkt erreicht, ab dem keine weitere Aufstreuung stattfindet, dies entspricht aber nicht einer isotropen Verteilung der Elektronen.

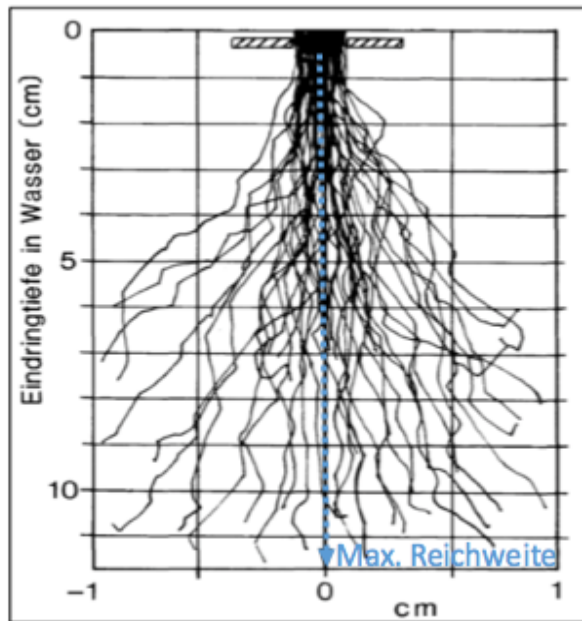


Abbildung 7: Aufstreuung der Elektronen

Auch in Abbildung 7 wird der Aufstreuueffekt der Elektronen dargestellt. Die maximale Reichweite wird über das Elektron definiert, welches am weitesten eindringt, jedoch kann diese Tiefe nicht ganz klar definiert werden, Die absolute maximale Reichweite würde ein Elektron erreichen, das zufällig bis zum Ende des Materials eindringen würde. Die Wahrscheinlichkeit hierfür liegt in Wirklichkeit bei 0.

2 Messen mit Elektronenstrahlung

Wie an den vorherigen Praktikumsterminen wurde zunächst der Linac eingeschaltet und das Wasserphantom aufgebaut. Für die Bestrahlung mit Elektronen wird zusätzlich ein Tubus an den Strahlerkopf angebracht. Die maximale Feldgröße bei Bestrahlungen mit Tuben beträgt 25x25 cm und der Abstand von der Tubusunterkante bis zum Fokus beträgt 95 cm. Dieser Aufsatz für Elektronenstrahlung wird zur Feldfokussierung aufgrund der starken Aufstreuung der Elektronen benötigt. Am unteren Ende des Tubus befindet sich der Endrahmen, dieser besteht aus 1cm dickem Blei (entspricht 11cm Wasser), sodass die Elektronen beim Auftreffen auf den Rahmen komplett absorbiert werden, dabei entsteht Bremsstrahlung. Diese Endrahmen sind kodiert, dadurch erkennt das System welcher Endrahmen benutzt wird. Die quadratischen Rahmen, die am Tubus in verschiedenen Höhen angebracht sind, werden benötigt um die Elektronen auch an der Innenseite der Rahmen zu streuen. Zusätzlich werden die Elektronen in der Luft gestreut, verlieren dabei aber nur einen kleinen Teil der Energie, sodass die Energiehomogenität weitestgehend vorhanden bleibt, im Gegensatz zu den früher verwendeten geschlossenen Elektronentubussen.

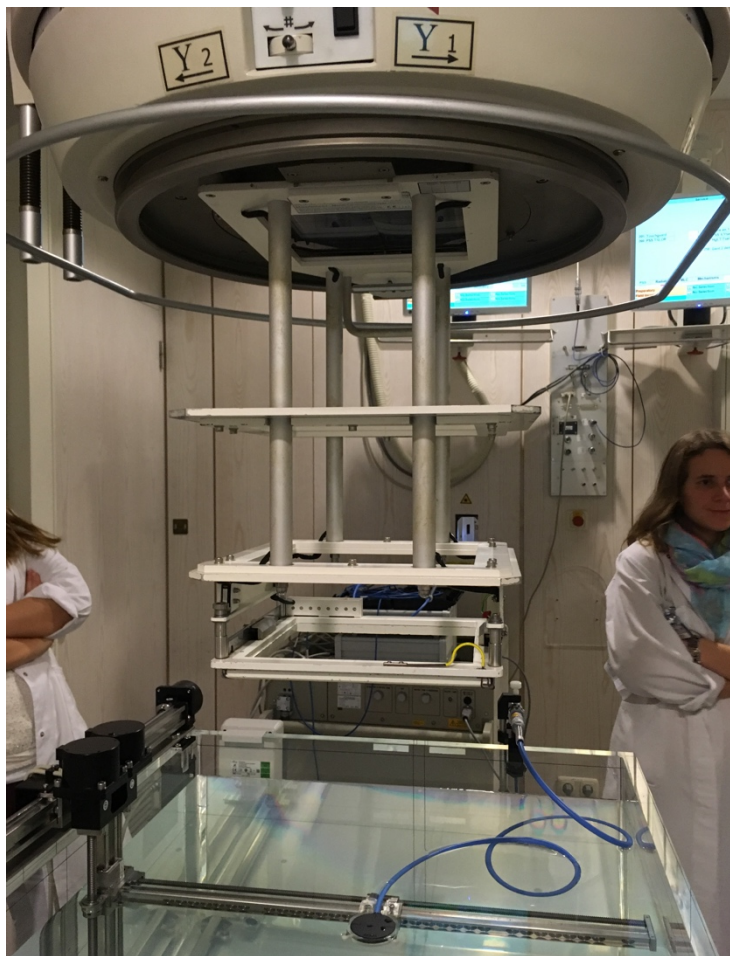


Abbildung 2: Strahlerkopf mit Elektronentubus

Bestrahlt man mit Elektronen und ohne Tubus, muss auch beachtet werden, dass das Lichtfeld nicht mehr dem Bestrahlungsfeld entspricht, Aufgrund der Streuung der Elektronen ist das Lichtfeld kleiner als das Bestrahlungsfeld. Bestrahlt man mit Tubus ist das Strahlungsfeld bei größeren Abständen auch etwas größer als das Lichtfeld.

Bei Bestrahlungen am Menschen wird der Tubus entweder direkt auf der Haut oder in einem

Abstand von 5 cm positioniert. Wird der Tubus im Abstand von 5 cm angebracht liegt die Patienten Oberfläche im Isozentrum und man hat

beim Ausrichten einen besseren Überblick, jedoch wird durch die Streuung der Elektronen der Rand des Bestrahlungsfeldes unschärfer.

2.1 Messung verschiedener TDV mit der Roos-Kammer

Die Roos-Kammer ist für Messungen von Querprofilen nicht geeignet, jedoch zeigt sie eine gute Ortsauflösung in Strahlrichtung und kann somit für TDV Messungen verwendet werden. Da die Kammer etwas aus dem Wasser herausragt, wurde der Tubus mit einem Abstand von ca. 2-3 mm über der Wasseroberfläche eingestellt um eine Kollision der Detektorhalterung mit dem Tubus auszuschließen. Der eingesetzte 20x20 cm Tubus gilt als Referenztubus für die Kalibrierung des Dosismonitors. Die Referenzkammer wurde erst nach vollständiger Einstellung der Kammer und des Tubus angebracht.

Einstellungen:

Tubus: 20x20 cm

Roos-Kammer ($0,35 \text{ cm}^3$): 200V

Referenzkammer: 400V

Feldgröße: 20x20 cm

SSD: 95 cm

Blendeneinstellungen:

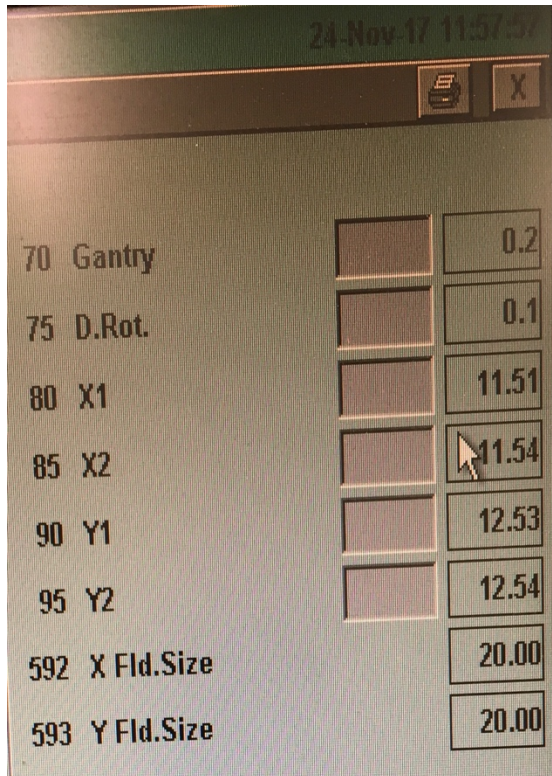


Abbildung 8: Blendenvoreinstellungen am Linac

In Abbildung 8 erkennt man, dass mit den Blendeneinstellungen (X1, X2, Y1, Y2) eine Feldgröße von ca. 23x25 cm eingestellt wurde. Diese Blendenvoreinstellungen müssen anhand der Querprofile für verschiedene Tubusgrößen und verschiedene Energien immer neu eingestellt und zusätzlich überprüft werden, da durch die sich ändernde Streuung der Elektronen auch der Outputfaktor verändert wird. An diesem Linac sind die Blendenvoreinstellungen schon eingestellt und werden automatisch entsprechend der Energien und Tubusgröße angepasst.

Nach Ermittlung des Nullpunktes durch den CenterCheck wurden verschiedene TDV mit Energien von 15MeV, 12 MeV, 10MeV, 8 MeV, 6MeV und 4 MeV von unten nach oben gemessen.

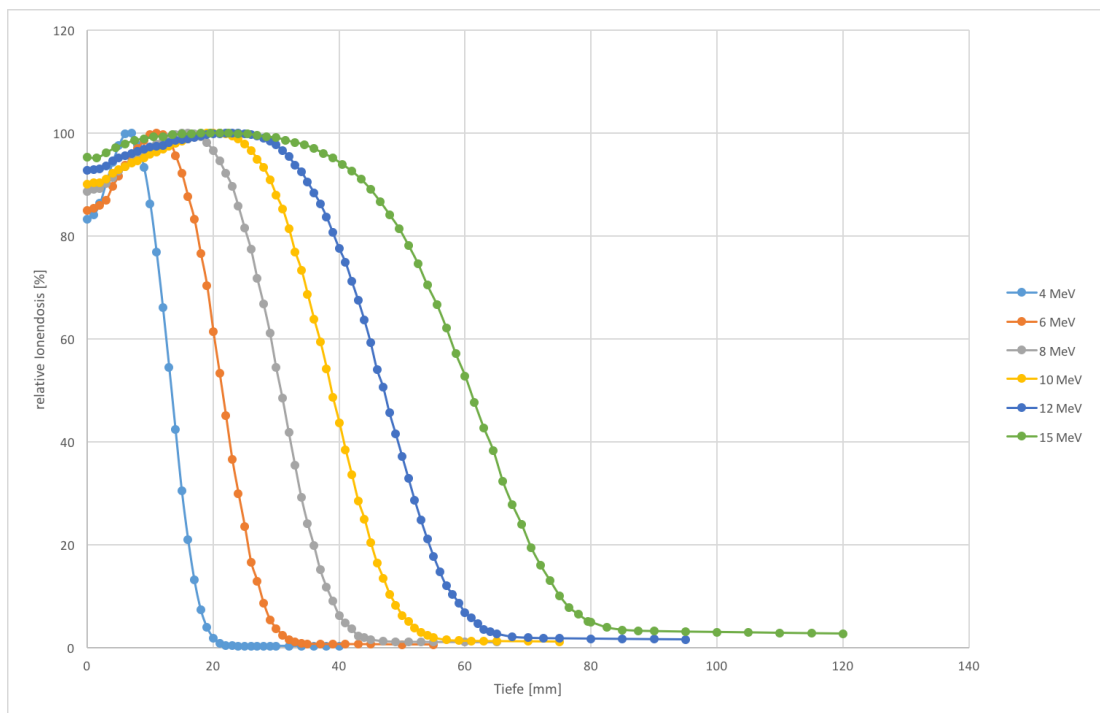


Abbildung 9: Messung Elektronenstrahlung mit Roos-Kammer

In Abbildung 9 erkennt man die bereits erläuterten Eigenschaften der Elektronenstrahlung. Man erkennt, dass im Vergleich zu Photonenstrahlung eine höhere Eintrittsdosis an der Oberfläche erreicht wird und die relative Dosis nach dem Dosismaximum steiler abfällt. Bei hohen Energien verlaufen auch bei unseren Messungen die TDV Kurven am Dosismaximum etwas breiter. Man erkennt auch, dass die Energie der Elektronen, nach Eintritt in einen Absorber, kontinuierlich mit zunehmender Tiefe abnimmt und am Ende des TDV die Elektronen komplett absorbiert werden, sodass die relative Ionendosis auf 0 abfällt; abgesehen vom Bremsstrahlungshintergrund.

2.2 Messungen verschiedener TDV mit der Farmer-Kammer

Die Messungen der TDV bei verschiedenen Energien wurden mit einer Farmer-Kammer wiederholt.

Einstellungen:

Tubus: 20x20 cm

Farmer-Kammer (0,6 cm³): 400V

Referenzkammer: 400V

Feldgröße: 20x20 cm

SSD: 95 cm

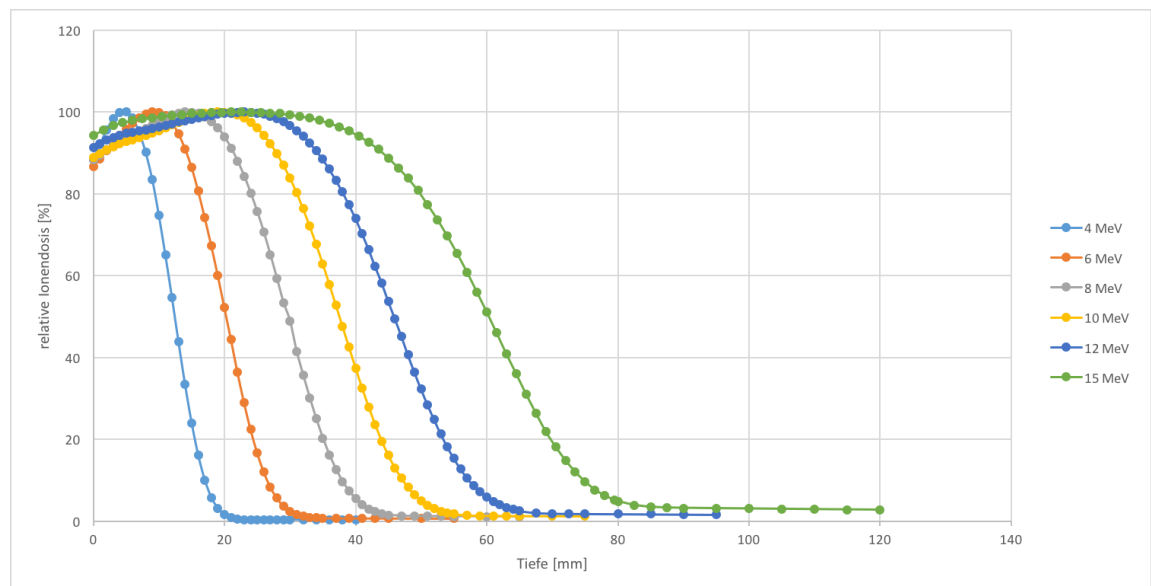


Abbildung 10: Messung Elektronenstrahlung mit Farmer-Kammer

Auch bei der Messung der Elektronenstrahlung mit der Farmer-Kammer (Abbildung 10) sind die wesentlich Eigenschaften der Elektronenstrahlung zu erkennen. und ca. 7% bei 6 MeV an.

2.2.1 Vergleich der Messungen mit Roos- und Farmer-Kammer

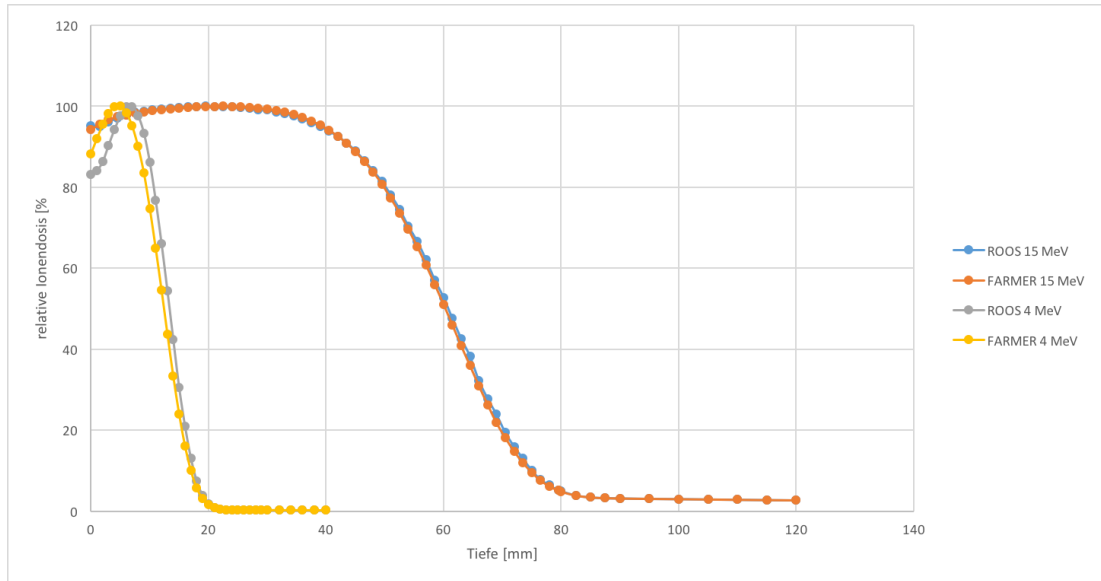
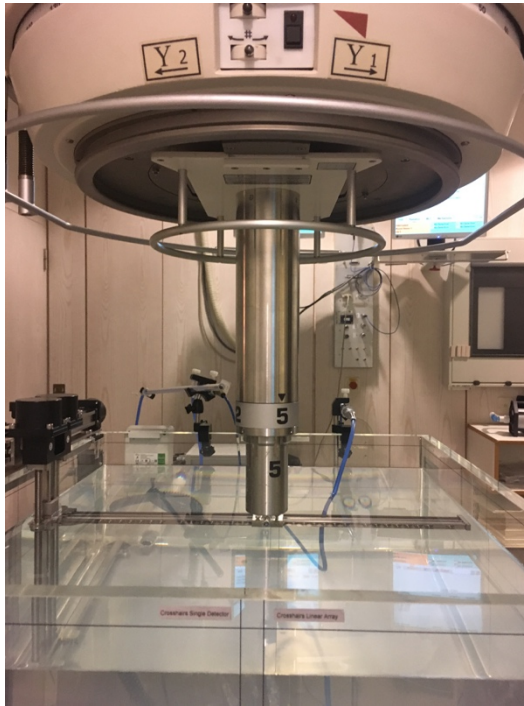


Abbildung 11: Vergleich Messungen mit Roos- und Farmer-Kammer

In Abbildung 11 werden die TDV, gemessen mit der Roos- und Farmer- Kammer bei 4 MeV und 15 MeV, miteinander verglichen. Man erkennt, dass die TDV Kurven bei 15 MeV sich sehr ähneln. Bei 4 MeV liegt das Maximum des TDV der Roos-Kammer tiefer als das Maximum des TDV der Farmer-Kammer. Der Volumeneffekt, der bei der Farmer-Kammer aufgrund des größeren Volumens auftritt, ist der Grund für die Abweichungen der TDV bei 4 MeV. Auch in der Praxis werden normalerweise Elektronen TDV nicht mit Farmer-Kammern gemessen.

2.3 Messungen verschiedener TDV mit einem Rundtubus

Zum Vergleich wurden die verschiedenen TDV mit einem Rundtubus gemessen. Bei einem Rundtubus können verschiedene Durchmesser eingestellt werden (2-5 cm), der jeweils entsprechende Aufsatz kann von unten in den Tubus eingesetzt werden.



Einstellungen:

Rundtubus: Durchmesser 5 cm

Flexible Kammer (0,125³): 400V

Ohne Referenzkammer

SSD: 95 cm

Abbildung 12: Strahlerkopf mit Rundtubus

Aufgrund der kleinen Feldgröße konnte die Referenzkammer nicht auf das Bestrahlungsfeld eingestellt werden. Die Messungen wurden deshalb ohne Referenzkammer durchgeführt und sind somit etwas verrauscht.

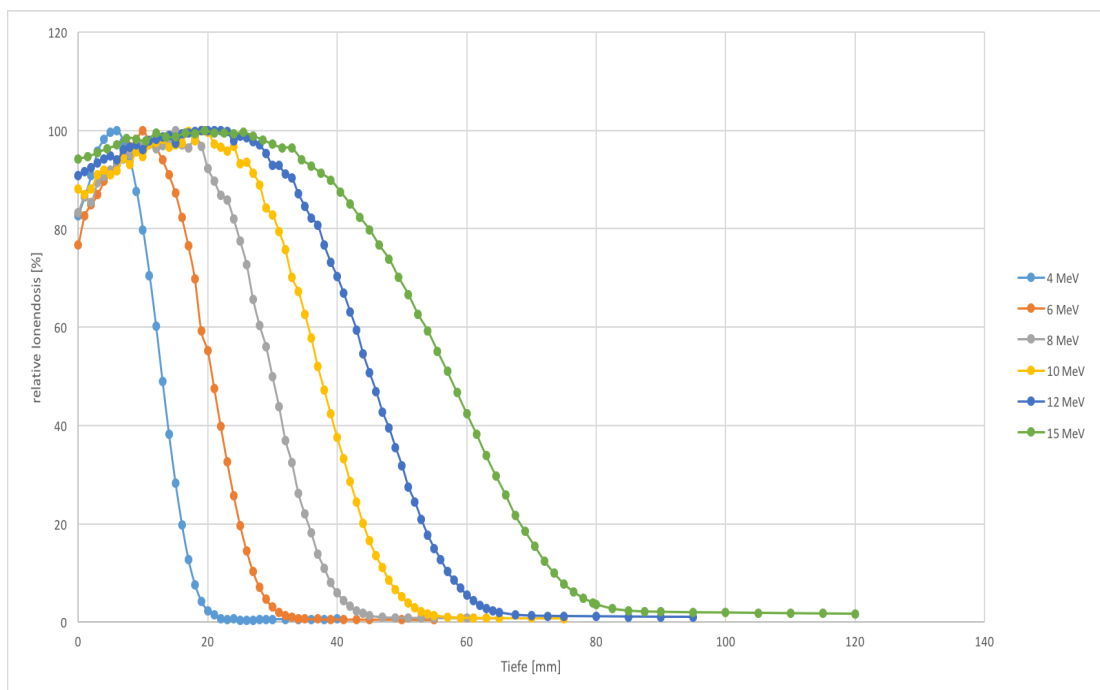


Abbildung 13: Messungen Elektronenstrahlung mit Rundtubus

2.3.1 Vergleich der Messungen mit Roos-Kammer und Rundtubus

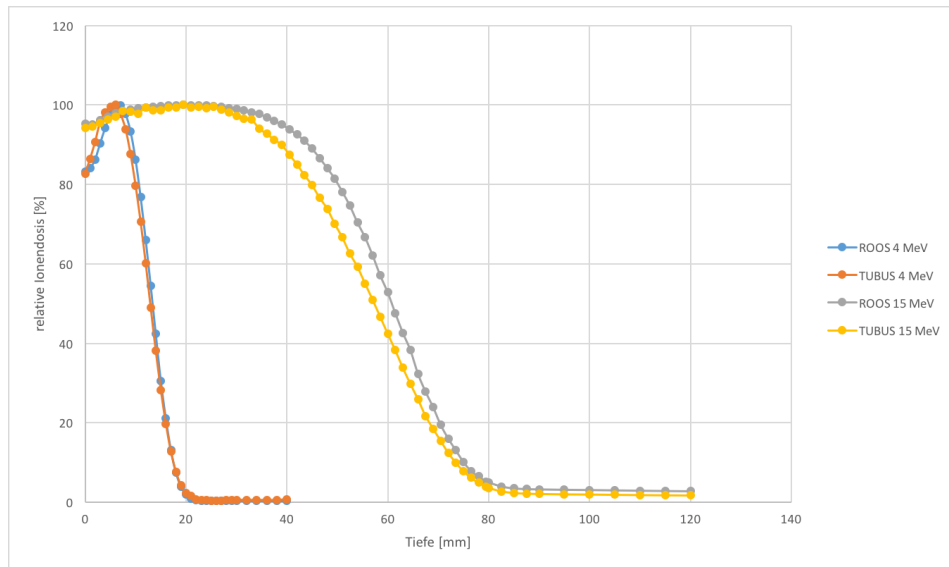


Abbildung 14: Vergleich Messungen Roos-Kammer und Rundtubus

In Abbildung 14 werden die TDV gemessen mit der Roos-Kammer und dem Rundtubus bei 4 MeV und 15 MeV miteinander verglichen.

Bei 4 MeV fällt die Kurve des Rundtubus nur minimal flacher ab als die Kurve gemessen mit der Roos-Kammer. Erst bei größeren Energien (15 MeV) und in größerer Tiefe verläuft die Kurve des Rundtubus deutlich unter der Kurve der Roos-Kammer. Diese Abweichung tritt auf, da die Elektronen in der Tiefe anfangen aufzustreuen, da das Feld bei den Messungen mit dem Rundtubus deutlich kleiner ist, wird mehr aus dem Feld rausgestreut und nur sehr wenig von außen nach innen eingestreut.

2.3.2 DOSE convert: Ionendosis → Wasserenergiedosis

Mithilfe des MEPHYSTO Programms können TDV Messungen, bei denen die relative Ionendosis gemessen wurde, umgerechnet werden in die Wasserenergiedosis. Dies wird mit dem Befehl **DOSE convert: PDI → PDD** durchgeführt.

PDI: Ionendosis

PDD: Wasserenergiedosis

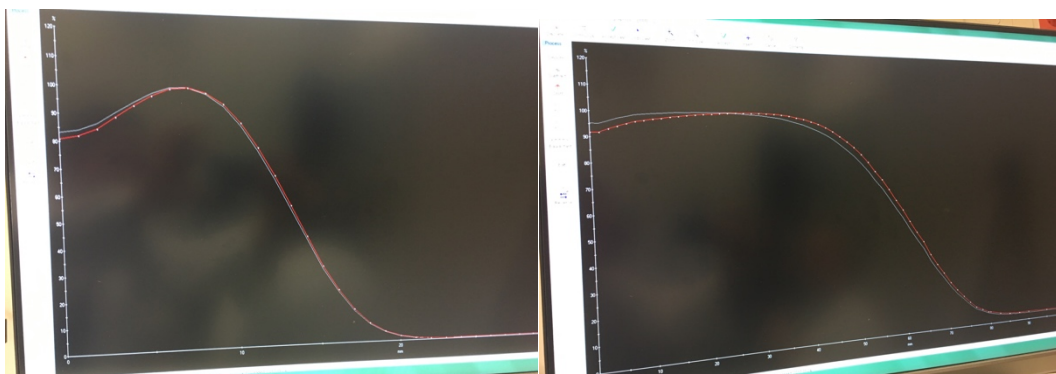


Abbildung 15: DOSE convert PDI --> PDD (4 MeV, 15 MeV)

Auch bei dieser Konvertierung werden die auf das Dosismaximum normierten Kurven verwendet. Die jeweils rot dargestellten Kurven sind die konvertierten PDD Kurven. Bei kleinen Energien (Abbildung 15, links) ist kein großer Unterschied der Kurven zu erkennen. Bei höheren Energien (Abbildung 15, rechts) verschiebt sich das Dosismaximum durch die Konvertierung in eine größere Tiefe. Anhand dieser Konvertierung können Abschätzungen der Werte des $s_{w,a}$ (Massenstoßbremsverhältnis Wasser/Luft) gemacht werden; da $s_{w,a}$ als Umrechnungsfaktor für Ionendosis in Luftenergiedosis eingesetzt wird. Man kann erkennen, dass die Werte für $s_{w,a}$ mit zunehmender Tiefe ansteigen müssen.

3 Ausblick in die Praxis

Man kann sagen, dass allgemein nur ca. 5% aller Bestrahlungsanwendungen mit Elektronenstrahlung durchgeführt werden.

Die geringe Eindringtiefe der Elektronenstrahlung kann vor allem bei Tumoren nahe der Patientenoberfläche, z.B. Melanomen an der Haut, Vorteile bringen. Der steile Abfall der Dosis nach Erreichen des Dosismaximums (speziell bei geringeren Energien) sorgt dafür, dass tiefer liegendes Gewebe weitestgehend geschont werden kann. Im Vergleich dazu kann mit höheren Elektronenenergien ca. über die ersten 5 cm, nach Eintritt ins Gewebe, eine relativ konstante Dosis erreicht werden, die danach auch wieder relativ steil abfällt.

Auch der komplette Abfall auf 0% Dosis bringt einen großen Vorteil, vor allem im Vergleich zur Photonenstrahlung, da dadurch tiefer liegendes Gewebe besser geschont werden kann.