
PROTOKOLL DOSIMETRIE

Praktikum 11.11.2016

17. NOVEMBER 2016

MAXIMILIAN KLIMT

1 Inhalt

2	Allgemeines.....	2
2.1	Definition Abstandsquadratgesetz	2
2.2	Verwendete Geräte und Materialien	3
3	Versuch 1: Abstandsquadratgesetz bei Photonenstrahlung.....	8
3.1	Versuchsaufbau	8
3.2	Versuchsdurchführung	8
3.3	Messergebnisse Photonenstrahlung.....	9
4	Versuch 2: Abstandsquadratgesetz bei Elektronenstrahlung.....	12
4.1	Messergebnisse Elektronenstrahlung.....	12
5	Versuch 3: Tiefendosis-Verlaufsmessung mit wasseräquivalentem Material im Vergleich zur Messung mithilfe eines Wasserphantoms.....	14

2 Allgemeines

Im ersten und zweiten Versuch des Praktikums wird die Anwendbarkeit des Abstandsquadratgesetzes auf die Dosisleistung der verwendeten Photonenstrahlung bzw. Elektronenstrahlung untersucht.

2.1 Definition Abstandsquadratgesetz

Das Abstandsquadratgesetz besagt, dass aufgrund der Divergenz von Strahlung die Dosisleistung pro Fläche mit zunehmendem Abstand von der Strahlenquelle umgekehrt proportional zum Quadrat des Abstands abnimmt.

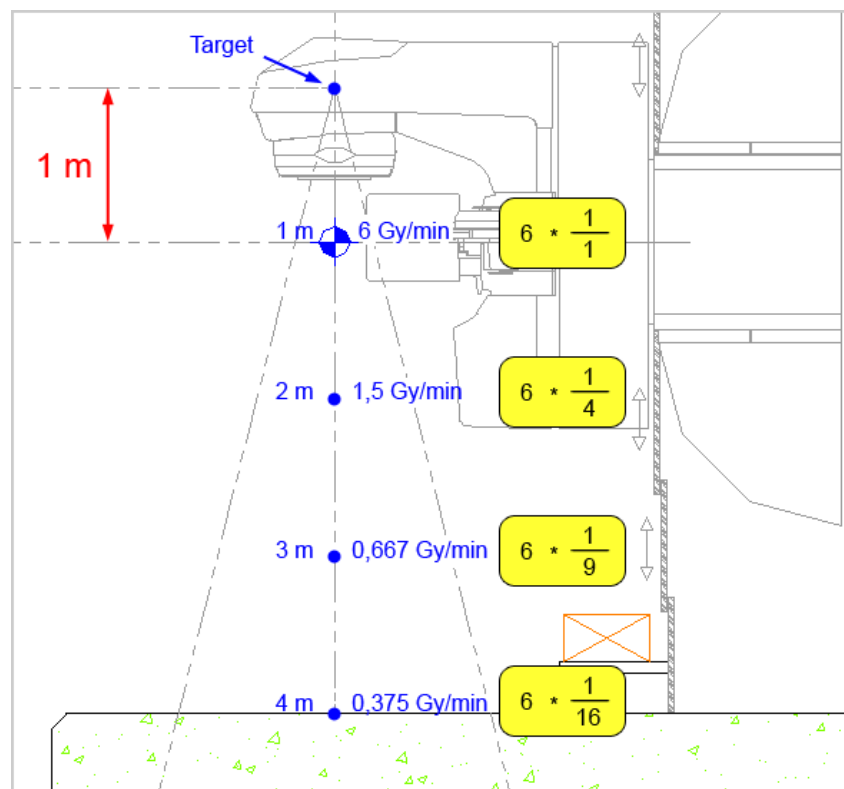


Abbildung 1: Beispielhafte Darstellung des Abstandsquadratgesetzes
(Quelle: <http://www.wienkav.at/kav/kfj/91033454/physik/ss/html/abstand2.html>)

In einer Formel ausgedrückt, lautet das Abstandsquadratgesetz:

$$\frac{D_2}{D_1} = \left(\frac{r_1}{r_2}\right)^2$$

Mit der Dosis D_x im Abstand r_x von der Strahlenquelle. Anhand Abbildung 1 ist zu erkennen, dass sich somit in einem doppelten Abstand zur Quelle nur ein Viertel der Dosis messen lassen sollte.

2.2 Verwendete Geräte und Materialien

Neben dem Linearbeschleuniger der Firma Elekta („Linac G“) wurden für die Praktikumsversuche folgende weitere Utensilien verwendet:

PTW UNIDOS

Als Messinstrument für alle Versuche wird das Elektrometer „PTW UNIDOS“ verwendet. Dieses kann auf zwei verschiedene Arten messen:

- Radiologisch: Mit Korrektionsfaktoren und Kalibrierfaktoren der im Setup Menü ausgewählten, jeweiligen Ionisationskammer. Ergebnis wird direkt in Gray (Gy) angegeben und Korrektionsfaktoren können im Nachhinein nicht mehr ausgelesen werden.
- Elektrisch: Absolute Ströme werden direkt gemessen und integriert über die Zeit. Ergebnis wird in Ladung (Coulomb, C) angegeben. Die Korrektionsfaktoren werden erst am Ende benötigt, was diese Methode nachvollziehbarer und somit weniger fehleranfällig als die radiologische Messmethode macht.

$$Q = \int I dt$$



Abbildung 2: PTW UNIDOS (Quelle: http://www.ptw.de/ptw_milestones.html)

Die Messtechnik des Gerätes ist dafür ausgelegt sehr präzise und absolute Messungen von Ladung und Strom durchzuführen, wobei die Messgrößen des Stroms in einem Bereich um ca. 10^{-15} Ampere liegen. Die Genauigkeit von besser als 2‰ im Bereich solch geringer Ströme spricht für eine sehr hohe Qualität der Messtechnik. Die Genauigkeit wird mithilfe von jährlichen Kontrollmessungen überprüft und sollte die Toleranzgrenze von 2‰ überschritten werden, wird das Gerät vom Hersteller neu kalibriert.

Des Weiteren können drei verschiedene Empfindlichkeitsbereiche ausgewählt werden, je nach angeschlossener Ionisationskammer und Dosierung der Strahlung.

Eine weitere, für diese Praktikumsversuche jedoch nicht verwendete Funktion der Messtechnik, ist die sogenannte Intervallmessung. Bei dieser Funktion können Intervalle von 6 bzw. 60 Sekunden eingestellt werden, in welcher die Messung des Stroms stattfindet. Dies eignet sich zum Beispiel für Messungen von Radionukliden, allerdings ist bei Messungen an Linearbeschleunigern diese Funktion nicht nötig, da der beschränkende Faktor durch die Abschaltzeit des Linearbeschleunigers nach Erreichen der zuvor eingestellten Monitoreinheiten gegeben ist.

Vor dem Beginn der Messungen sollte stets ein Nullabgleich erfolgen, dafür wird die Ionisationskammer zunächst vorbestrahlt und der Strom gemessen (sog. „Warmstrahlen der Ionisationskammer“). Nach dieser Vorbestrahlung erfolgt der Nullabgleich des PTW UNIDOS und die eigentliche Messreihe kann beginnen.

Die Dosis der ersten Impulse bedingt durch den Einschaltvorgang des Linearbeschleunigers ist nicht konstant und große Abweichungen sind möglich. Durch Selbstregulierung des Linearbeschleunigers sollten die Monitoreinheiten jedoch bei allen nachfolgenden Signalimpulsen konstant sein. Diese anfänglichen Abweichungen wurden jedoch in den nachfolgenden Versuchen „vernachlässigt“. Wir gehen davon aus, dass die anfänglichen Schwankungen bei allen Messungen dieselben, so dass deren Auswirkung auf die Ergebnisse in allen Fällen dieselbe ist. Dasselbe gilt auch für Patientenbestrahlung, da diese in der gleichen Art und Weise durchgeführt werden wie die Dosismessungen und sich die Schwankungen herauskürzen und somit vernachlässigbar sind.

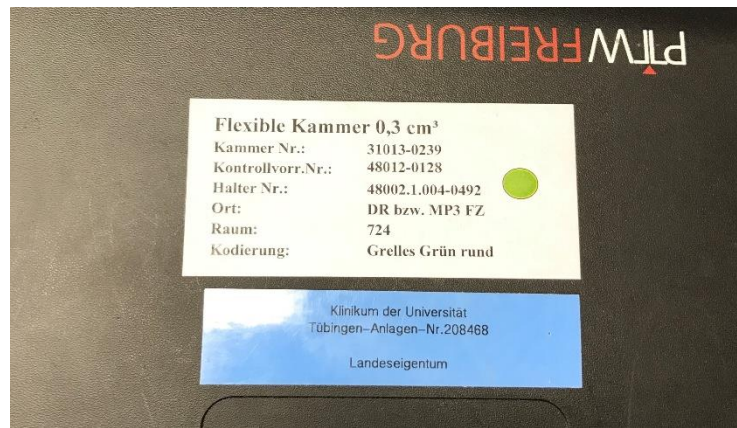
Flexible Ionisationskammer $0,3\text{mm}^3$

Im ersten und zweiten Teil des Praktikumsversuchs wird die Flexible Ionisationskammer $0,3\text{mm}^3$ (auch Kompaktkammer genannt) der Firma PTW verwendet, um die Anwendung des Abstandsquadratgesetzes bei Photonen- und Elektronenstrahlung zu untersuchen. (Weitere Details im Protokoll vom 28.10.2016)



Abbildung 3: rechte Kammer entspricht der von uns verwendeten Kammer
(Quelle: http://www.ptw.de/semiflex_chambers0.html)

Abbildung 4: Eckdaten der verwendeten Flexiblen Kammer



Advanced Markus Ionisationskammer

Im letzten Teil des Praktikumsversuchs wird die Advanced Markus Ionisationskammer zusammen mit RW3-Platten verwendet, um einen Tiefendosisverlauf in wasseräquivalentem Material zu bestimmen. Diese Kammer ist eine sogenannte Flachkammer mit abnehmbarer Plexiglasabdeckung (Weitere Details im Protokoll vom 28.10.2016)



Abbildung 5: Advanced Markus Ionisationskammer (Flachkammer)

Quelle:

http://www.ptw.de/advanced_markus_electron_chambe.html

RW3-Platten

Platten der Firma PTW aus wasseräquivalentem Material zur Kalibrierung und Messung des Tiefendosisverlaufs von Strahlung. Erhältlich in unterschiedlichen Dicken (1;2;5;10mm) und mit vorgefertigten Platten für die Inkorporation von Ionisationskammern zur Dosisbestimmung.



Abbildung 6: RW3-Platten der Firma PTW (Quelle: http://www.ptw.de/acrylic_and_rw3_slab_phantoms0.html?&cld=3503)

Elektronentubus

Der Elektronentubus ist ein Zusatz für den Linearbeschleuniger, welcher für Elektronenstrahlung nötig ist. Er wird direkt an den Strahlerkopf montiert und sorgt dafür, dass die Elektronenstrahlung homogenisiert wird und der Endrahmen des Tubus sorgt dafür, dass das Strahlenfeld im Isozentrum (ein Meter entfernt vom Fokuspunkt im Strahlerkopf) auf ein Feld von z.B. hier $10 \times 10 \text{ cm}^2$ begrenzt ist.

Moderne Elektronentubusse bestehen aus einem Metallgerüst mit immer geringer werdender Durchlassfläche. Diese Geometrie der Tubusse sorgt für ein homogenes Querprofil der Elektronenstrahlung und somit ein homogenes Gesamtfeld mit hochenergetischer Elektronenstrahlung in herstellerabhängiger Tiefe (Elekta: 95cm, Tubus direkt auf Patient aufgesetzt, Feld immer gleichgroß, z.B. $10 \times 10 \text{ cm}^2$; Siemens: 100cm, wenn Tubus direkt auf Patient aufgelegt, z.B. Feld nur 9,5 statt $10 \times 10 \text{ cm}^2$ groß!).

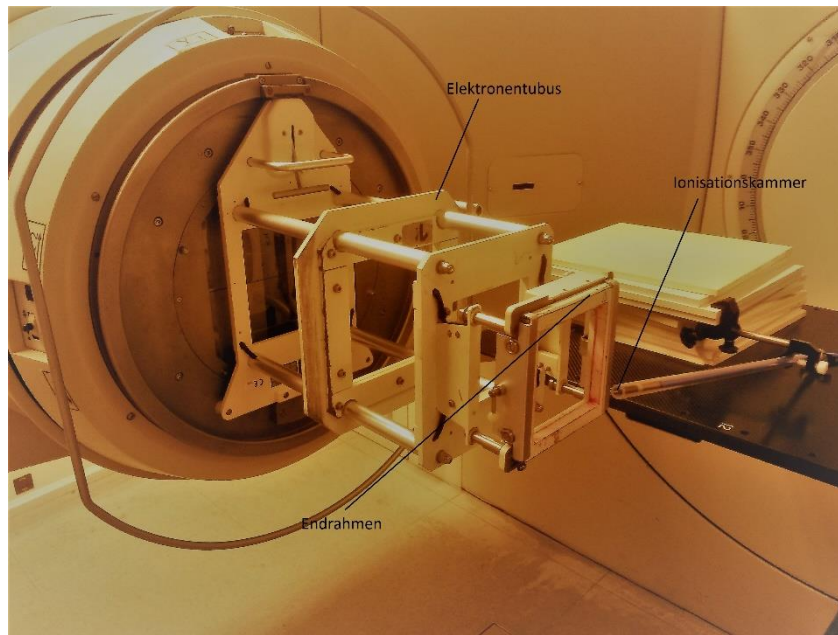


Abbildung 7: Darstellung des Elektronentubus im Strahlerkopf, mit Endrahmen und Ionisationskammer

Für einen Elektronentubus sind 16 verschiedene Endrahmeneinsätze möglich, welche durch Lochraster codiert sind und dem Linearbeschleuniger somit die entsprechende Blendeneinstellung vorgeben.

Der Schutzmechanismus für den Patienten ist gewährleistet durch einen Kontakt am Ende der Tubus, welcher durch Druck ausgelöst wird und die Tischbewegung und die Strahlung abschaltet, um das Risiko von Verletzung zu minimieren.

3 Versuch 1: Abstandsquadratgesetz bei Photonenstrahlung

Vorab

Da der Linearbeschleuniger vor den Versuchen nicht in Betrieb gewesen ist, müssen ca. 10 Minuten „Aufwärmzeit“ für das Magnatron und Thyatron gewährleistet sein, bevor die Versuchsdurchführung beginnen kann!

3.1 Versuchsaufbau

Für diesen Versuch wird die Gantry auf die Position 270° geschwenkt, um eine größere Messtrecke zu ermöglichen, allerdings begrenzt sich diese raumbedingt auf 3,31m gemessen vom Fokuspunkt des Linearbeschleunigers (bzw. des Targets) befindlich im Strahlerkopf.

Die Dosis wird mithilfe der zuvor erwähnten Kompaktkammer frei in Luft gemessen. Dazu wird diese mithilfe eines am Tisch befestigten Plexiglasrohres so positioniert, dass sich die Kammer mittig im Strahl befindet. Um das Ergebnis nicht durch Streustrahlung zu verfälschen, sollte darauf geachtet werden, dass sich im Umfeld so wenig wie möglich anderes Material befindet. Idealerweise sollte dieser Versuch im Vakuum stattfinden und nicht in der Luftatmosphäre. Trotz aller getroffenen Vorsichtsmaßnahmen gibt es dennoch Faktoren, die das Ergebnis beeinflussen:

- Schwankung des Linearbeschleunigers (Quelle der Strahlung)
- Ungenauigkeiten beim Versuchsaufbau (Entfernung / Zentrierung der Kammer)
- Streustrahlung an Objekten (vor allem in Nähe der raumbegrenzenden Wand)
- Fehler der Messtechnik (Ionisationskammer, Kabel, PTW UNIDOS)

3.2 Versuchsdurchführung

Für diese Messreihe wird eine Energie von 6MV und 100 Monitoreinheiten (MU1), bzw. 102 Monitoreinheiten (MU2) gewählt. Das Feld begrenzt durch den Multilamellenkollimator (MLC), beträgt $10 \times 10 \text{ cm}^2$.

Die erste Messposition der Ionisationskammer befindet sich im Isozentrum (100cm entfernt vom Fokuspunkt des Strahlerkopfes), danach folgen 5 weitere Messpunkte, alle um 50cm weiter entfernt vom Fokuspunkt, bis auf die letzte Messposition, bei der sich wandbedingt nur 31cm hinzufügen lassen.

Vor der eigentlichen Messung der Daten, werden zwei Wiederholungsmessungen durchgeführt, da die ersten beiden Messungen unterschiedlich gegenüber den darauffolgenden Messungen sein können. Dies ist begründet durch das elektrostatische Gleichgewicht, welches sich erst nach den anfänglichen Wiederholungsmessungen einstellt und für konstante Werte in darauffolgenden Messungen sorgt.

An allen sechs Messpunkten wird der Strom in der Ionisationskammer mithilfe des PTW UNIDOS gemessen, in Ladung integriert und in der untenstehenden Tabelle eingetragen. Außerdem werden die mithilfe des Abstandsquadratgesetzes berechneten Werte den gemessenen Werten gegenübergestellt.

3.3 Messergebnisse Photonenstrahlung

Durch die Proportionalität der Ladung zur Dosis ergibt sich aus dem Abstandsquadratgesetz folgendes für die Ladung:

$$Q_{berechnet} = Q_{gemessen} \cdot \left(\frac{r_1}{r_2}\right)^2$$

Mithilfe dieser Formel und des gemessenen Ladungswertes im Isozentrum (Hier: entspricht Referenzwert) können die restlichen Werte berechnet werden:

$$Q_{berechnet} = 9,780nC \cdot \left(\frac{1m}{r_2}\right)^2$$

Entfernung in Meter	Gemessene Ladung in nC	Berechnete Ladung in nC	Abweichung in %
1	9,780	9,780	0
1,5	4,291	4,347	1,31
2	2,389	2,445	2,34
2,5	1,496	1,565	4,61
3	1,082	1,087	0,46
3,31	0,897	0,893	-0,45

Tabelle 1: Vergleich gemessener und berechneter Ladung der Photonenstrahlung

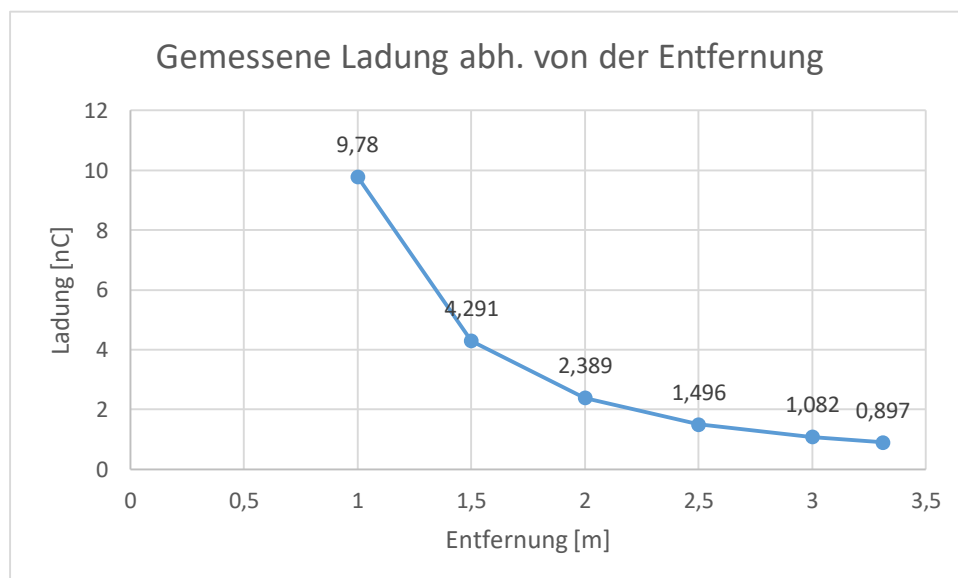


Abbildung 8: Ladungswerte aus Tabelle 1 aufgetragen abhängig von der Entfernung

Um zu zeigen, dass die Ladung (bzw. Dosis) quadratisch mit dem Abstand abfällt, ist es von Vorteil, eine Regression des in Abbildung 7 dargestellten Abfalls der Ladung mithilfe einer Geraden herzustellen. Dazu wird der Messpunkt im Isozentrum gewählt und mithilfe von Umformung des Abstandsquadratgesetzes eine Geradenformel erstellt:

$$Q_r = Q_1 \cdot \left(\frac{r_1}{r}\right)^2$$

$$Q_r = \frac{Q_1 r_1^2}{r^2}$$

Mit der Wurzel auf beiden Seiten und dem Kehrwert ergibt sich:

$$\frac{1}{\sqrt{Q_r}} = \frac{1}{\sqrt{Q_1 r_1^2}} \cdot r = \frac{1}{\sqrt{9,780nC \cdot 1m^2}} \cdot r$$

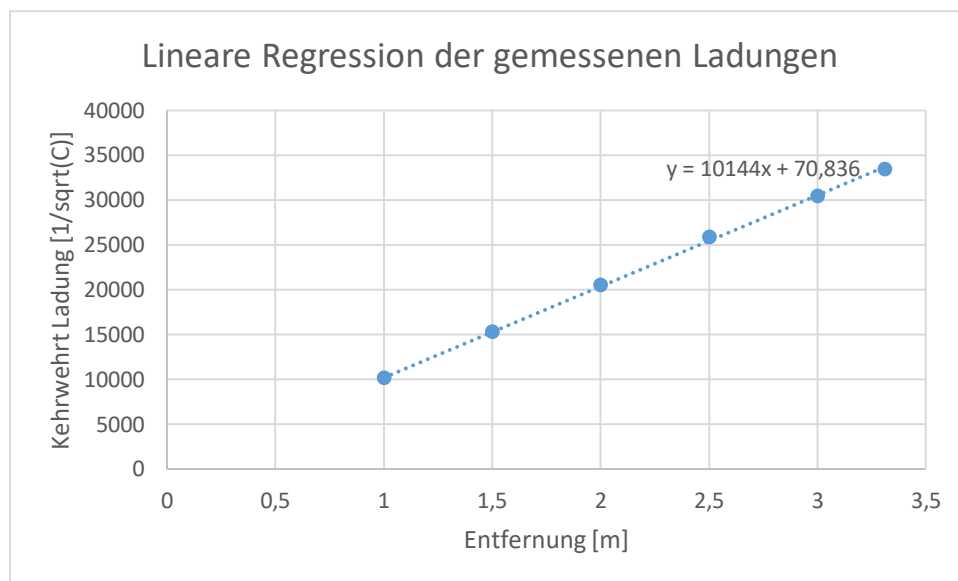


Abbildung 9: Lineare Regression zu in Abbildung 7 dargestellten Ladungswerten

Aus der obigen Gleichung ergibt sich dann für die gemessenen Entfernungen eine solche Regression. Der Kehrwert der Gleichung $y=10144x+70,836$ zum Quadrat ergibt für eine Entfernung von einem Meter folglich die Ladung Q_1 .

Anhand der Tabelle (maximale Abweichung bezogen auf Referenzwert: 4,6%) und den beiden Kurvenverläufen ist ersichtlich, dass unter Berücksichtigung der Ungenauigkeiten bei Versuchsaufbau, -durchführung und Messungen während des Praktikumsversuches, das Abstandsquadratgesetz in guter Näherung bei Photonenstrahlung angewandt werden kann.

Wichtig: Plausibilitätskontrolle!

Bei allen Anwendungen in der Medizinischen Physik von hoher Bedeutung, hier speziell für das Abstandsquadratgesetz gilt:

Während die Dosisleistung durch das Verhältnis $\frac{D_1}{D_2} = \left(\frac{r_2}{r_1}\right)^2$ gegeben ist, verhalten sich die Monitoreinheiten umgekehrt, mit dem Verhältnis $\frac{D_1}{D_2} = \left(\frac{r_1}{r_2}\right)^2$, sprich die Monitoreinheiten müssen bei größerer Entfernung erhöht werden, um die gleiche Dosis zu erhalten.

4 Versuch 2: Abstandsquadratgesetz bei Elektronenstrahlung

In diesem Teil des Praktikumsversuchs wird analog zum Versuch 1 untersucht, inwieweit das Abstandsquadratgesetz anwendbar ist, diesmal jedoch nicht für Photonen-, sondern Elektronenstrahlung verschiedener Energien. Um eine Vergleichbarkeit der Messungen von Versuch 1 und 2 zu gewährleisten, bleibt der Versuchsaufbau im Grunde derselbe. Einzige Ausnahme für die Bestrahlung mit Elektronen ist, dass im Gegensatz zu der Photonenbestrahlung ein Elektronentubus notwendig ist. Dieser sorgt für eine Feldgröße von $10 \times 10 \text{ cm}^2$ analog zur Photonenstrahlung.

4.1 Messergebnisse Elektronenstrahlung

Analog zu Versuch 1 werden auch für die Elektronenstrahlung sowohl gemessene, als auch mit dem Abstandsquadratgesetz berechnete Werte für die Ladung tabellarisch aufgelistet.

Tabelle 2 zeigt die Werte der Ladung für 4 MeV, Tabelle 3 für 15 MeV. Dabei fallen die maximalen prozentualen Abweichungen direkt ins Auge, ca. 223% für 4 MeV und 24% für 15 MeV.

Entfernung In Meter	Gemessene Ladung In nC	Berechnete Ladung In nC	Abweichung In %
1	6,770	6,770	0,0
1,5	1,605	3,009	87,47
2	0,525	1,693	222,69

Tabelle 2: Vergleich gemessene und berechnete Ladungen für 4 MeV Elektronenstrahlung

Entfernung In Meter	Gemessene Ladung In nC	Berechnete Ladung In nC	Abweichung In %
1	9,438	9,438	0,0
1,5	3,483	4,195	20,43
2	1,898	2,360	24,32

Tabelle 3: Vergleich gemessene und berechnete Ladungen für 15 MeV Elektronenstrahlung

Aus den Tabellen sind zwei klar erkennbare Trends abzuleiten:

- Der Fehler wird größer, je geringer die Elektronenenergie
- Der Fehler wird größer, je weiter die Entfernung vom Fokuspunkt

Ebenso wie bei den Messergebnissen der Photonenstrahlung wird hier eine lineare Regression der Daten in Abbildung 10 dargestellt.

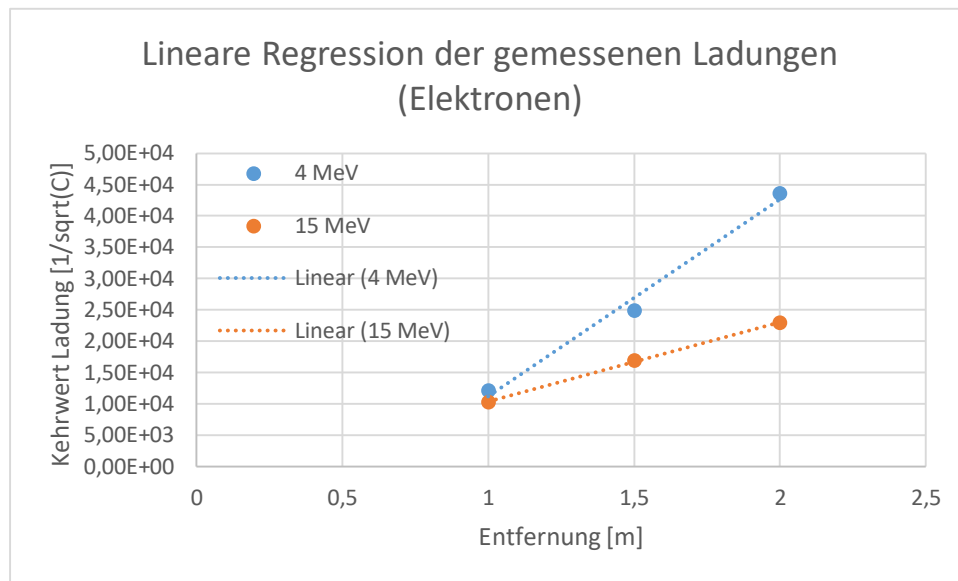


Abbildung 10: Lineare Regression beider Energien der Elektronenstrahlung

Anhand dieser Regression ist selbst für eine geringe Anzahl von Messwerten schon klar zu erkennen, dass eine lineare Regression hier keinen Sinn ergibt. Die Gerade sollte, wie es bei der Photonenstrahlung der Fall war, durch den Ursprung gehen.

Aufgrund dieser Tatsache ist ersichtlich, dass die Wechselwirkung der Elektronenstrahlung mit Luft so stark ist, dass eine Anwendung des Abstandsquadratgesetzes grundsätzlich für Elektronenstrahlung unzulässig ist. Die einzige Ausnahme, die man machen kann ist bei der Anwendung in Vakuum.

Des Weiteren ist zu erkennen, dass je geringer die Energie der Elektronenstrahlung (hier: 4MeV) desto größer ist der Effekt durch Wechselwirkung mit der Luft, auch direkt ersichtlich aus der Tabelle 2.

5 Versuch 3: Tiefendosis-Verlaufsmessung mit wasseräquivalentem Material im Vergleich zur Messung mithilfe eines Wasserphantoms

Im Gegensatz zu den vorherigen Praktikaversuchen, bei welchen ein Wasserphantom zur Bestimmung des Tiefendosisverlaufs herangezogen wurde (vgl. 28.10.2016), wird hier wasseräquivalentes Material verwendet.

Dazu werden für den Versuchsaufbau RW3-Platten der Firma PTW verwendet und mithilfe der Flachkammer mit abnehmbarer Plexiglasscheibe die Dosismessung durchgeführt.

Für diesen Versuch wird die Gantry wieder auf die Winkelposition 0° gefahren und die „Wasseroberfläche“ im Isozentrum (Abstand 100cm) definiert. Um die Ionisationskammer nicht zu zerstören, wird sie in eine Platte mit einem vorgefertigten Loch gelegt und zwei 1mm Platten so neben die Flachkammer gelegt, dass darauf gelegte Platten keinen direkten Kontakt mit der Oberfläche der Flachkammer haben.

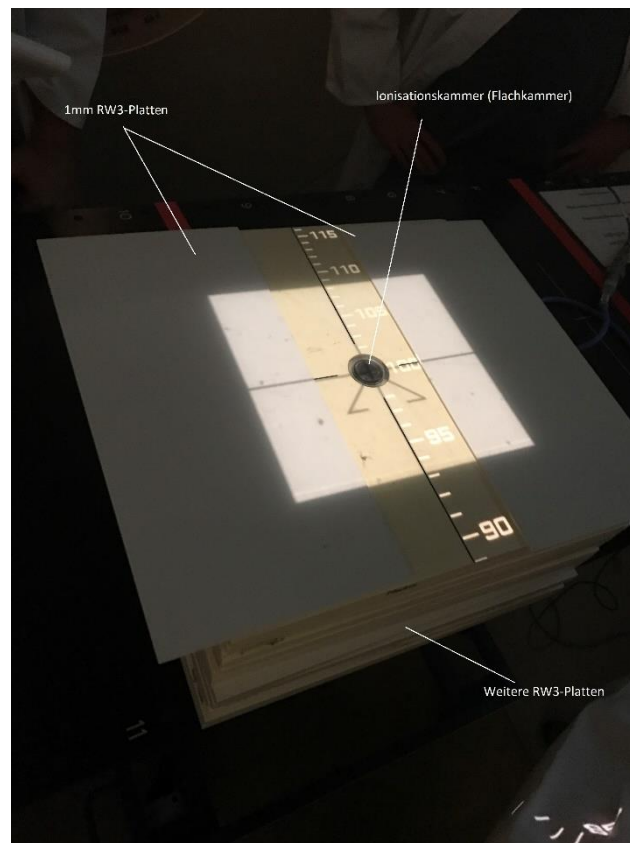


Abbildung 11: Aufbau der RW3-Platten mit Ionisationskammer

Durch Auflegen von verschiedenen RW3-Platten, muss die Tischhöhe immer entsprechend der Dicke der aufgelegten RW3-Platte angepasst werden, um den Fokus-Oberflächen-Abstand (FOA) konstant zu halten. Die Dosismessung wird so lange durchgeführt, bis das Dosismaximum erreicht wird.

Die untenstehende Tabelle 4 zeigt die gemessenen Ladungen abhängig vom Abstand zum Isozentrum, wobei das Maximum nach 15mm definiert wird, da hier das Dosismaximum erreicht ist und der Aufbaueffekt an diesem Punkt abgeschlossen ist. Alle anderen Messpunkte werden auf das Dosismaximum (100%) normiert.

Abstand zum Isozentrum = Tiefe in mm	Gemessene Ladung In nC	Gemessene Ladung normiert bzgl. Maximum
0	278,5	25,9
1	546	50,9
3	811	75,6
5	937	87,3
9	1007	93,8
11	1047	97,5
13	1073	99,9
15	1074	100

Tabelle 4: Gemessene Tiefendosis/ Ladung in nC und normierte Ladung auf Maximum in 15mm Tiefe

In Abbildung 12 sind die gemessenen Ladungswerte aus Tabelle 4 zusammen mit den ermittelten Werten der letzten Praktikumsversuche (28.10.2016, 04.11.2016) mit Wasserphantom aufgetragen. Wie die Werte aus Tabelle 4 sind auch die Werte der anderen Kurven auf ihr Dosismaximum normiert. Ein Unterschied, welcher direkt ins Auge fällt, ist, dass der Tiefendosisverlauf ermittelt mit den RW3-Platten, mit einer viel geringeren Dosis (~25% geringer) als die anderen Tiefendosisverläufe beginnt. Da RW3-Platten in Strahlenwissenschaften ein wasseräquivalentes Material ist, sollte das Ausbreitungsmedium keinen Einfluss auf die Kurve haben.

Der einzige Unterschied zwischen den Messungen ist, dass die Flachkammer bei den Messungen mit RW3-Platten keine Plexiglasschutzscheibe hatte, sondern diese vor den Messungen entfernt wurde. Im Gegensatz zur Kompaktkammer, welche im Wasser verwendet wurde, musste bei der Flachkammer keine Plexiglasabdeckung verwendet werden. Daher ist zu vermuten, dass der Aufbaueffekt schon im Plexiglas begonnen hat, bevor dieser die Kompaktkammer überhaupt erreichen konnte. Dies ist für die Flachkammer nicht der Fall, da die Ionisationskammer nicht abgedeckt worden ist und somit der Aufbaueffekt erst in der Kammer an sich beginnen kann.

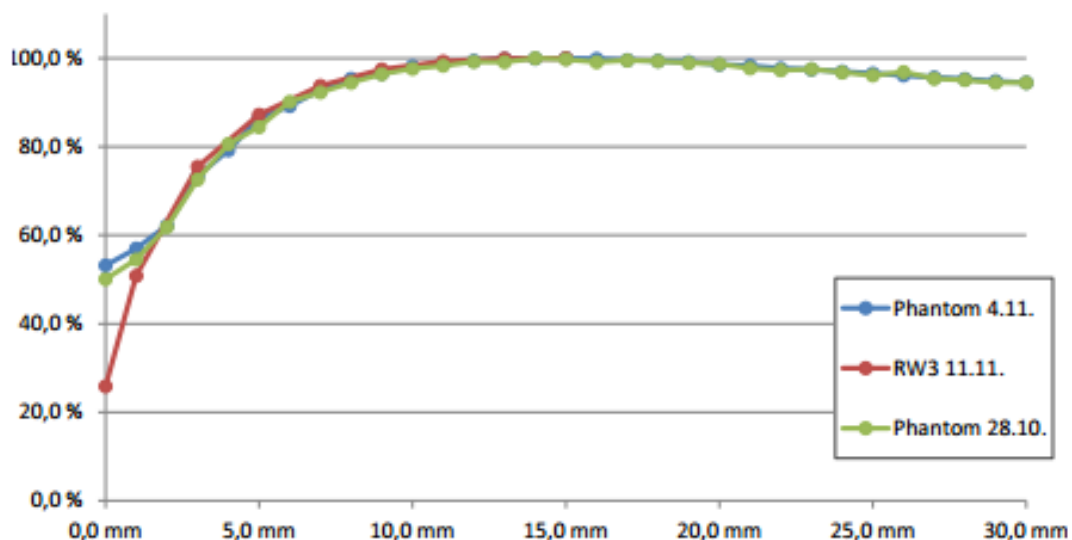


Abbildung 12: Tiefendosisverlauf der verschiedenen Praktikumsversuche