Konstruktion einer ortsauflösenden Ionisationskammer für Bremsstrahlungs-Polarisationskorrelations-Experimente

Jan Loibl
Johannes Gutenberg Universität Mainz
Bachelorarbeit im Fach Physik

8. Juni 2012

Erstgutachter	Herr PD Dr. K. Aulenbacher
Zweitgutachter	Univ.-Prof. Dr. Hans-Jürgen Arends

Eidesstattliche Erklärung

Ich erkläre hiermit an Eides statt, dass ich die vorliegende Arbeit selbstständig und ohne Benutzung anderer als der angegebenen Hilfsmittel angefertigt habe; die aus fremden Quellen direkt oder indirekt übernommenen Gedanken sind als solche kenntlich gemacht. Die Arbeit wurde bisher in gleicher oder ähnlicher Form keiner anderen Prüfungskommission vorgelegt und auch nicht veröffentlicht.

Ort, Datum *Jan Loibl*

Inhaltsverzeichnis

1 Zusammenfassung **1**

2 Theoretische Grundlagen **2**
2.1 Funktion einer Ionisationskammer 2
2.2 Vermessung der Strahlposition 2

3 Vorversuch mit einer nicht ortsauflösenden Ionisationskammer **7**
3.1 Aufbau der Ionisationskammer 7
3.2 Versuchsaufbau 9
3.3 Offsetmessung 10
3.4 Kalibrierungsmessung 11
3.5 Messung zur Untersuchung der Abhängigkeit des Signalstroms vom Strahlstrom 13
3.6 Ergebnisse des Vorversuchs 14

4 Planung und Konstruktion der ortsauflösenden Ionisationskammer **15**

5 Versuche mit der ortsauflösenden Ionisationskammer **20**
5.1 Versuchsaufbau 20
5.2 Ermittlung einer geeigneten Betriebsspannung 21
5.3 Offsetmessung 22
5.4 Messung zur Untersuchung der Abhängigkeit des Signalstroms vom Strahlstrom 23
5.5 Ermittlung der Lageempfindlichkeit 25
5.5.1 Vertikale und horizontale Auslenkung 26
5.5.2 Rastermessung 28

6 Ergebnisse und Ausblick **35**

7 Appendix **36**
7.1 Abbild der Gammastrahlungsverteilung 36
7.2 Danksagung 36
7.3 Literaturverzeichnis 37

1 Zusammenfassung

Ziel dieser Bachelorarbeit ist es, eine ortsauflösende Ionisationskammer zur Strahldiagnose der Vektorpolarimeterexperimente der B2-Gruppe zu konstruieren. Dieses Experiment dient zur Messung der Polarisationsrichtung des im Teilchnbeschleuniger MAMI erzeugten Elektronenstrahls. Man betrachtet dabei Asymmetrien der in Bremsstrahlungsprozessen entstehenden Photonen. Die Messungen werden durch Schwankungen der Elektronenstrahlintensität und durch Änderung der Strahlposition verfälscht. Die geplannte Ionisationskammer soll diese Werte messen, sodass entsprechende Korrekturen durchgeführt werden können. Im nächsten Kapitel werden die für diese Arbeit notwendigen theoretischen Grundlagen vermittelt. Im dritten Kapitel werden Versuche mit einer nicht ortsauflösenden Ionisationskammer durchgeführt. Diese steht zu Beginn der Arbeit bereits zur Verfügung. Mit ihr werden Versuche durchgeführt, um erste Konzepte zum Kammerdesign, Messmethodik und Verbesserungen zu erstellen. Die gesammelten Erfahrungen gehen dann mit in die Konstruktion der neuen Kammer ein. Die Konstruktion wird im vierten Kapitel behandelt. Dort wird die Funktionsweise und der Zweck der einzelnen Bauteile erläutert. Nach der Fertigstellung wird in Kapitel fünf die Funktion der Kammer in mehreren Experimenten geprüft. Insbesondere wird die Kammer darauf getestet, ob sie eine Positionsverschiebung des Elektronenstrahls messen kann. Im letzten Kapitel werden Verbesserungsvorschläge und eine zukünftige Verwendung der Kammer diskutiert.

2 Theoretische Grundlagen

2.1 Funktion einer Ionisationskammer

Eine Ionisationskammer ist ein gasgefüllter Strahlen- und Teilchendetektor. Sie zeichnet sich durch einen relativ einfachen Aufbau und dadurch hohe Zuverlässigkeit aus. Abbildung 1 zeigt den schematischen Aufbau solch einer Ionisationskammer. Zu sehen ist ein Kondensator, zwischen dessen Elektroden eine Spannung anliegt, sodass sich ein elektrisches Feld ausbildet. Das Messprinzip beruht darauf, dass das zu detektierende Teilchen entlang seines Weges Gasmoleküle ionisiert. Die so entstehenden Elektronen und Ionen driften dann auf Grund des elektrischen Feldes zu der Anode bzw. Kathode. Dadurch entsteht ein messbarer Strom. Das elektrische Feld muss dabei stark genug sein, sodass die Teilchen auf ihrem Weg nicht rekombinieren.

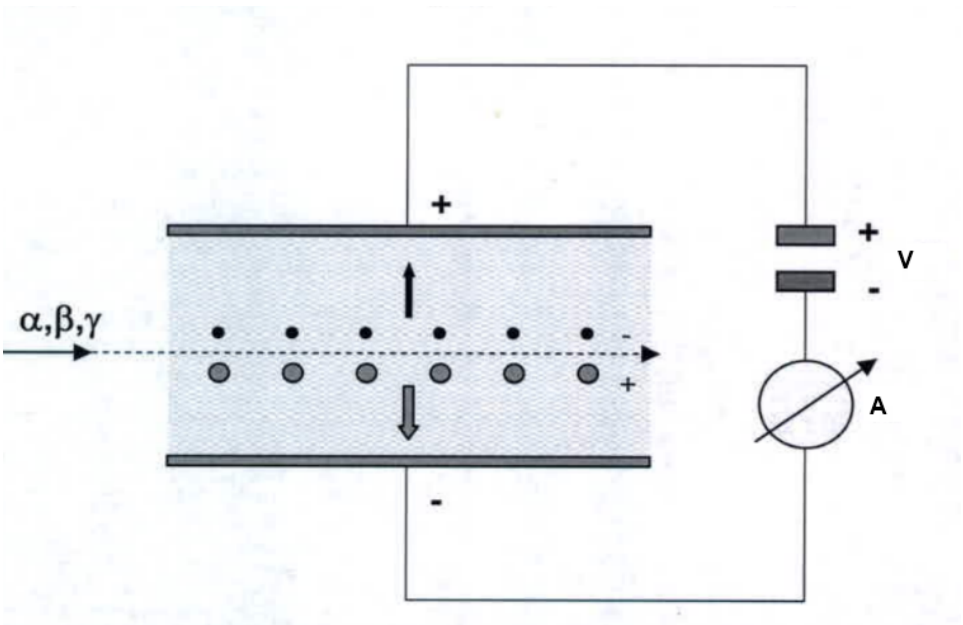

Abbildung 1: Funktionsprinzip einer Ionisationskammer. Das in den Kondensator einfliegende Teilchen ionisiert auf seinem Weg Gasmoleküle. Die ionisierten Moleküle driften daraufhin auf Grund des elektrischen Feldes zur Kathode. Die Ionen kann man dann als Strom messen. [Kri11]

2.2 Vermessung der Strahlposition

Bei dem zu vermessenden Teilchenstrahl handelt es sich um einen 3.5 MeV Elektronenstrahl. Dieser würde allerdings bereits im Aluminiumgehäuse der Kammer in Wärme und Gammastrahlung konvertieren. Um ein stärkeres Signal zu erhalten, werden die Elektronen bereits vor dem Gehäuse in ei-

nem Bleiradiator konvertiert. Dadurch erzielt man eine höhere Ausbeute an Gammastrahlung, da man sich näher an der kritischen Energie E_c befindet. Bei dieser Energie ist der Energieverlust durch Bremsstrahlung gleich dem Verlust durch Kollisionen. Liegt die Energie des einfallenden Teilchens darüber so überwiegt der Verlust durch Bremsstrahlung und umgekehrt. Die kritischen Energien in Aluminium und Blei sind nach [Leo94]:

$$E_c(\text{Blei}) = 9.51\,\text{MeV} \qquad E_c(\text{Aluminium}) = 51.0\,\text{MeV}$$

Die entstehende Gammastrahlung bildet dann auf Grund von Compton-Streuung im Inneren der Kammer die Elektron-Ion-Paare. Beim Austritt aus dem 0.3 mm dicken Abschlußflansch der Strahlführung kommt es zu Vielfach-Coulomb-Streuung. Dadurch werden die vorher auf 1 mm Durchmesser fokusierten Elektronen in einem Öffnungswinkel von S1 = 12° gestreut. Diesen Wert berechnet man mit der Formel von Lynch und Dahl [Leo94]. Treffen die Elektronen danach auf den Bleiradiator, so konvertieren sie unter einem Öffnungswinkel von γ^{-1} zu Gammastrahlung. Bei 3.5 MeV Elektronen entspricht das einem Winkel von S2 = 7°. Im Experiment detektiert man also nicht direkt die Elektronen des Teilchenstrahls, sondern die durch eine um die Ausbreitungsrichtung des Elektronenstrahls symmetrische Gammastrahlungsverteilung produzierten Elektron-Ion-Paare.

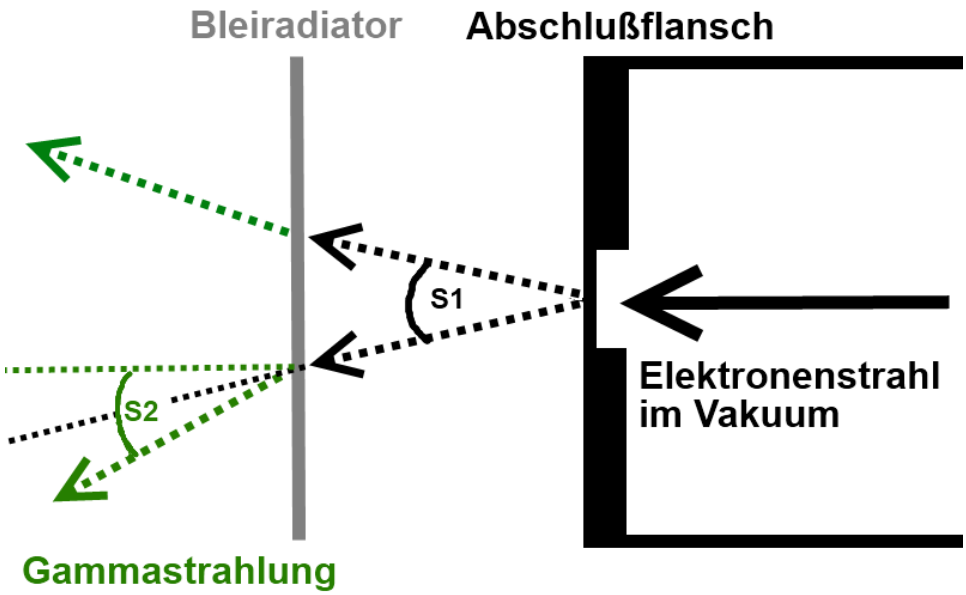

Abbildung 2: Schema zur Konvertierung der Elektronen in Gammastrahlung. Die Elektronen treten über eine dünn gedrehte Stelle des Abschlußflansches aus dem Vakuum. Dabei werden sie mit einem Öffnungswinkel von S1 = 12° gestreut. Danach werden sie im Bleiradiator in Gammastrahlung und Wärme konvertiert. Dabei kommt es nochmals zu einer Streuung um S2 = 7°.

Die Intensität der entstehenden Strahlung ist proportional zu der Zahl der Elektronen, die im Blei umgewandelt werden.
Um abzuschätzen, wie tief die Primärelektronen des Teilchenstrahls in den Radiator eindringen, verwendet man die Bethe-Bloch-Formel [Leo94].

$$-\frac{dE}{dx} = \text{const} \cdot \rho \cdot \frac{Z}{A \cdot \beta^2} \cdot \left(\ln(2 \cdot m_e \cdot \gamma^2 \cdot \beta^2 \cdot c^2 \cdot \frac{W_{max}}{I^2}) - 2\beta^2 \right)$$

const :	$2.456 \cdot 10^{-15} \frac{J \cdot m^2}{kg}$
c :	Lichtgeschwindigkeit
m_e :	Elektronenmasse
I :	Mittleres Anregungspotential des Materials
Z :	Atomzahl des Absorbers
A :	Massenzahl des Absorbers
ρ :	Dichte des Absorbers
β :	$\frac{v}{c}$ des einfallenden Teilchens
γ :	$1/\sqrt{1-\beta^2}$
W_{max} :	maximaler Energieübetrag bei einer Wechselwirkung

Das mittlere Anregungspotential ergibt sich nach [Leo94]:

$$I = (9.76 + 58.8 Z^{-1.19}) \cdot Z \,\text{eV}$$

für Blei zu

$$I_{max} = 827.77 \,\text{eV}$$

Löst man nun die Differentialgleichung, erhält man die Energie eines Elektrons in Abhängigkeit der Eindringtiefe. In Abb. 3 sieht man die mit Mathematica berechnete numerische Lösung.

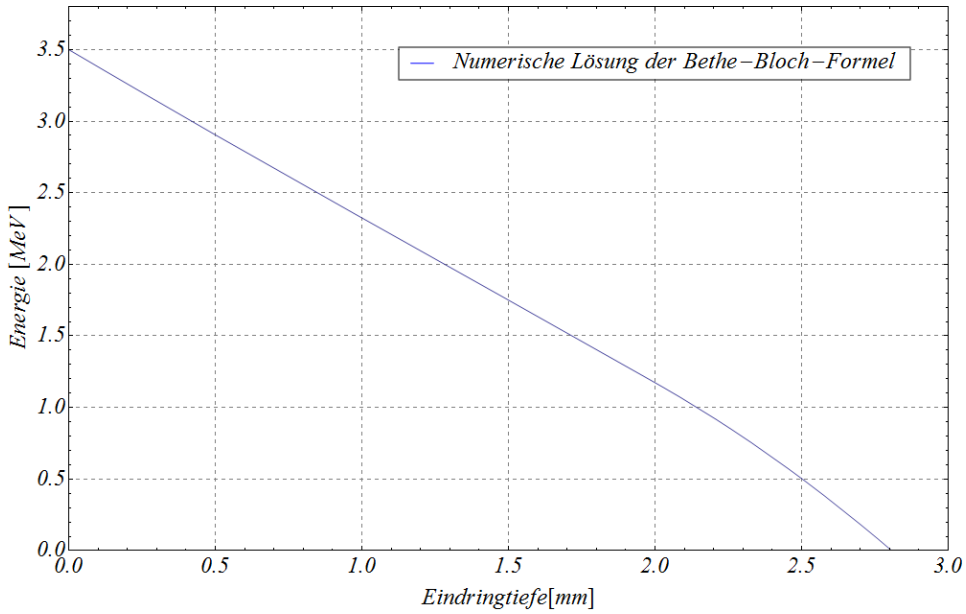

Abbildung 3: Numerische Lösung der Bethe-Bloch-Formel für ein Elektron mit einer Energie von 3.5 MeV. Ab einer Eindringtiefe von 2.80 mm ist die Energie der Elektronen null und die Teilchen sind vollständig zu Gammastrahlung und Wärme konvertiert.

Aus dieser Abschätzung schließt man, dass die Primärelektronen aus dem Teilchenbeschleuniger nach x_0=2.80 mm ihre gesamte Energie abgegeben haben.

3 Vorversuch mit einer nicht ortsauflösenden Ionisationskammer

3.1 Aufbau der Ionisationskammer

Zu Beginn der Bachelorarbeit steht ein Prototyp einer nicht ortsauflösenden Ionisationskammer zur Verfügung. Diese wird verwendet, um erste Erfahrungen mit Messtechnik und Aufbau zu sammeln. Die Abmessungen des Kammergehäuses sind:

Breite	20 cm
Tiefe	10 cm
Höhe mit Haltestangen	16.5 cm

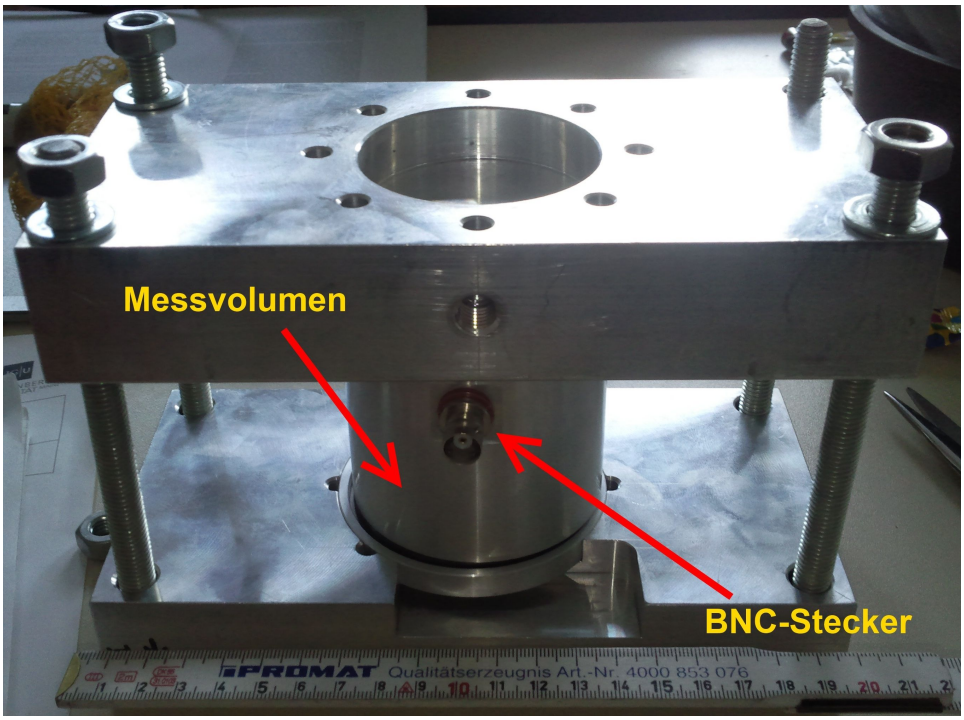

Abbildung 4: Nicht ortsauflösende Ionisationskammer mit Gehäuse. Im Zylinder zwischen den beiden Aluminiumplatten befindet sich das Messvolumen.

Die Abbildung 4 zeigt die Ionisationskammer mit Gehäuse. In dem Zylinder in der Mitte des Aufbaus befindet sich das Messvolumen. In den zwei sichtbaren Aluminiumplatten ist jeweils eine Aussparung, in denen der Zylinder einen halben Zentimeter in das Metall eingelassen wird, um diesen

auf Position zu halten. Durch die vier Gewindestangen an den Ecken wird mittels Muttern, der gesamte Aufbau zusammengepresst, um diesen zu fixieren. Am Zylinder befindet sich ein BNC-Stecker, an den man die Kammer beschaltet.

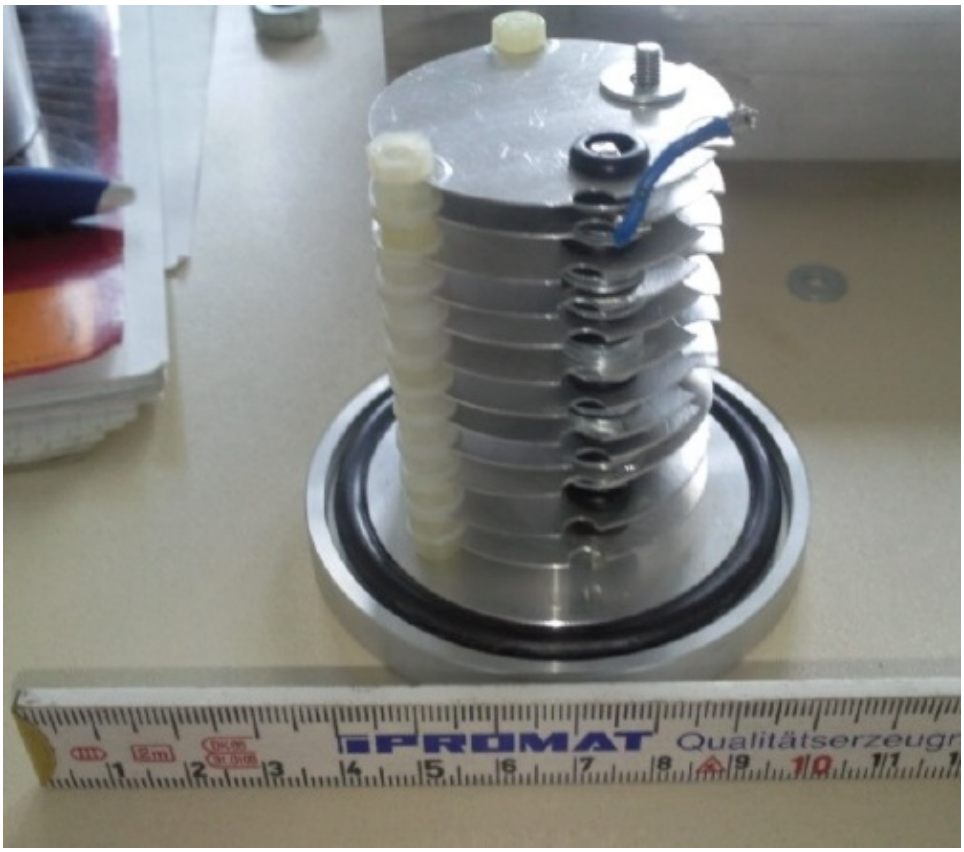

Abbildung 5: Ionisationskammer ohne Gehäuse. Die Platten werden von den zwei weißen Plastikstangen gehalten. Die beiden Metallstangen versorgen die Kammer mit Spannung. Dabei liegt eine der Stangen auf Masse und eine auf der Betriebsspannung. Sie sind so mit den Platten verbunden, dass diese Abwechselnd auf Masse und Betriebspannung liegen. Zur Isolation werden schwarze Kunststoffringe verwendet und zur Kontaktierung Metallmuttern.

Abbildung 5 zeigt die Ionisationskammer ohne Gehäuse. Das Innere der Kammer besteht aus zwölf kreisrunden Aluminiumplatten von 0.5 mm Dicke. Diese werden von zwei weißen Plastikstangen gehalten, die im Zylinderboden befestigt sind. Die Platten werden über zwei Metallstangen mit Spannung versorgt. Dabei ist eine mit der Betriebsspannung und eine mit der Masse verbunden. Um die Platten abwechselnd auf Masse und Betriebs-

spannung zu schalten, ist jede Metallstange abwechselnd mit einer schwarzen Gummiisolierung und einer Metallmutter mit den Platten verbunden. Durch die Metallmuttern wird eine Kontaktierung der Platten sichergestellt. Die Platten haben einen Durchmesser von 4.7 cm und sind auf einer Länge von 5.7 cm verteilt, was einem Messvolumen von 100 cm^3 entspricht. Der Abstand der einzelnen Platten beträgt etwa 0.5 cm.

3.2 Versuchsaufbau

Die Abbildung 6 zeigt den Lageplan des Teilchenbeschleunigers MAMI. Die Ionisationskammer wird hinter dem Endflansch der Strahlführung 35, welcher sich neben dem RTM1 befindet, positioniert.

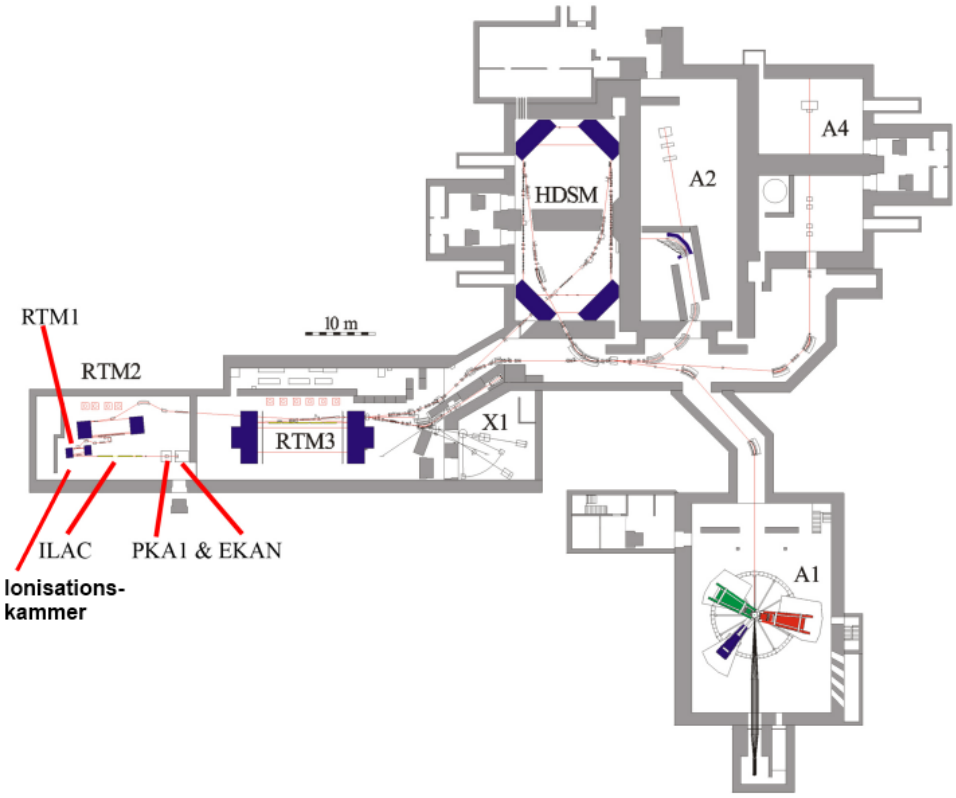

Abbildung 6: Lageplan von MAMI. Die Ionisationskammer befindet sich am Ende der Strahlführung 35 [Ale10].

Der Flansch ist in der Mitte des Strahlrohrs dünn gedreht, sodass austretende Elektronen möglichst wenig Material zum Austritt durchdringen müssen. Auf dem Endflansch ist die Position der dünn gedrehten Stelle mit einer fluoreszierenden Schicht markiert. Auf diese wird die Kammer ausgerichtet. Der Bleiradiator steht zwischen Flansch und Kammer. Um den

Raumwinkel, in den die Gammastrahlung ausgesandt wird, möglichst klein zu halten, steht der Radiator direkt an der Ionisationskammer. Um eine Kalibrierung der Ortsdosisleistung durchzuführen, wird im Versuchsaufbau zusätzlich ein Ortsdosis-Leistungsmessgerät platziert.

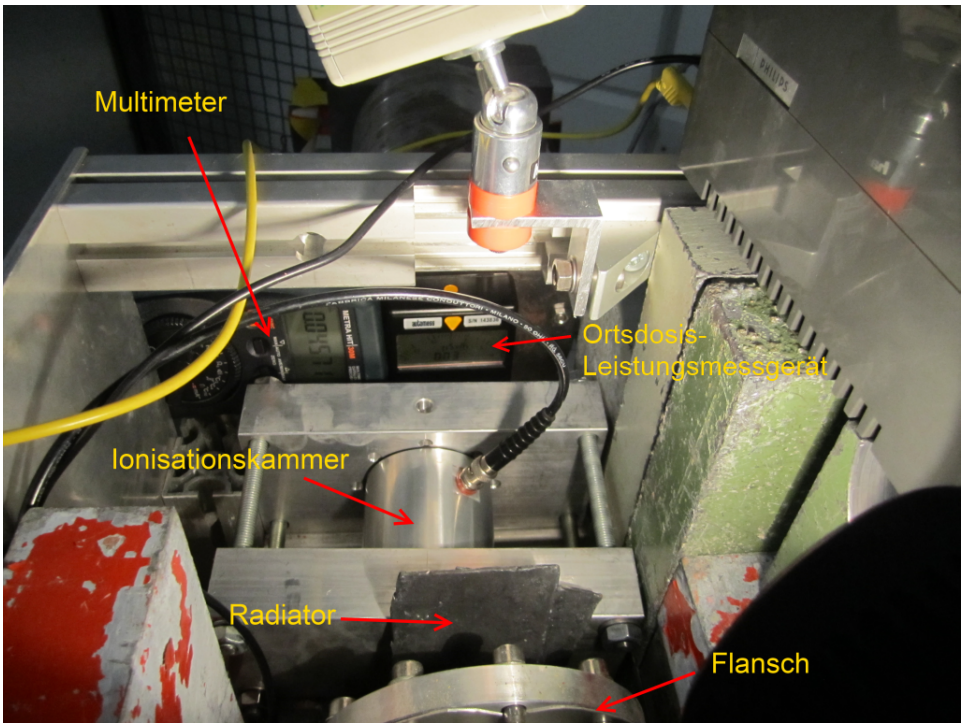

Abbildung 7: Versuchsaufbau mit der nicht ortsauflösenden Ionisationskammer. Die Elektronen treten senkrecht zum Endflansch aus der Strahlführung. Danach werden sie im Bleiradiator in Gammastrahlung konvertiert. Die Gammastrahlung wird schließlich von der Ionisationskammer detektiert.

Um den Strom der Ionisationskammer zu messen, wird der Spannungsabfall über den Innenwiderstand eines Multimeters gemessen. Für den Versuch wird eine Betriebsspannung der Kammer von 30 Volt eingestellt. Damit ergibt sich ein elektrisches Feld von E= 6 $\frac{\mathrm{kV}}{\mathrm{m}}$ zwischen den Platten. Die Ionisationskammer wird wie in Abb. 1 beschaltet.

3.3 Offsetmessung

Zunächst wird eine Offsetmessung durchgeführt. Dazu wird die Spannung an der Ionisationskammer gemessen, während der Teilchenstrahl noch ausgeschaltet ist. Die so gemessene Spannung kann man mit dem Innenwiderstand des Multimeters in einen Strom umrechnen. Die Fehler für die gemessene Spannung bzw. für den gemessenen Strom werden dadurch bestimmt, dass

die Werte auf dem Display des Multimeters kurz beobachtet werden. Danach wird ein gemittelter Wert notiert und die maximale Abweichung von diesem als Fehler verwendet.

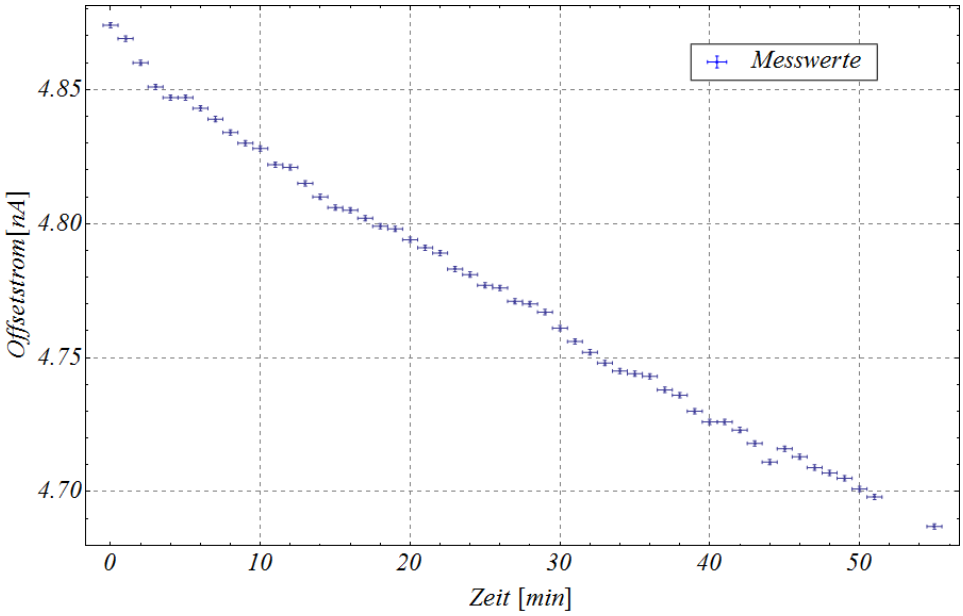

Abbildung 8: Offsetstrom gegen die Zeit. Man sieht, dass sich der Offsetstrom um 0.2 nA pro Stunde reduziert.

In Abbildung 8 fällt auf, dass der Offset mit der Zeit nicht konstant bleibt. In der Messung reduziert sich dieser um 0.2 nA pro Stunde. Dies liegt vermutlich an Leckströmen, die durch unzureichende Isolierung innerhalb der Ionisationskammer auftreten. In der späteren Planung der ortsauflösenden Ionisationskammer wird versucht, diesen Effekt zu minimieren.

3.4 Kalibrierungsmessung

Es wird eine Kalibrierungsmessung durchgeführt, um zu bestimmen, welche Ortsdosisleistung man bei einem bestimmten Strahlstrom erreicht. Dazu variiert man die Stärke des Strahlstroms und nimmt die Werte des Ortsdosis-Leistungsmessgeräts auf. Gleichzeitig betrachtet man die Spannung am Multimeter, um zu sehen, ab welchem Strahlstrom man eine Veränderung feststellen kann. Die Fehler für die Ortsdosisleistung werden bestimmt wie zuvor die Fehler des Signalstroms. Der Fehler des Strahlstroms wird auf 5% abgeschätzt, da der Elektronenstrahl in diesem Toleranzbereich einstellbar war.

Strahlstrom [nA]	Ortsdosisleistung [mSv/h]	offsetbereinigtes Ausgangssignal [nA]
1	2.82±0.08	0.03 ± 0.01
2	5.82±0.08	0.04 ± 0.01
3	9.85±0.08	0.06 ± 0.01

Tabelle 1: Messwerte der Kalibrierungsmessung.

An den Messwerten erkennt man, dass ab einem Strahlstrom von 1 nA von der Ionisationskammer erste Signale messbar sind. Diese sind allerdings in der Größenordnung der für sie festgelegten Fehler gleich. Wenn man die Ortsdosisleistung nach Abzug des Untergrundes linear anfittet, erhält man durch die Steigung den Umrechnungsfaktor von Strahlstrom zu Ortsdosisleistung. Den Fit mit den dazugehörigen Messwerten sieht man in Abb. 9. Die Steigung der Fitgeraden beträgt:
$m = 3.52 \pm 0.30 \, \frac{\mathrm{mSv/h}}{\mathrm{nA}}$
Dieser Faktor kann jedoch nur als Abschätzung dienen. Um eine verlässliche Umrechnung zu gewährleisten, benötigt man mehr Messpunkte insbesondere im Bereich für höhere Strahlströme und somit höherer Ortsdosisleistung. Mit einer solchen Messung könnte man den proportionalen Zusammenhang zwischen Strahlstrom und entstehender Gammastrahlung nachweisen. Dies konnte auf Grund des maximalen Messbereichs des Ortsdosis-Leistungsmessgeräts von bis zu 9.99 mSv/h nicht durchgeführt werden. Hier zeigt sich bereits der Vorteil einer Ionisationskammer. Während das verwendete Ortsdosis-Leistungsmessgerät zum messen kleiner Ortsdosisleistungen geeignet ist, eignet sich eine Ionisationskammer zum messen von hohen Ortdsosisleistungen.

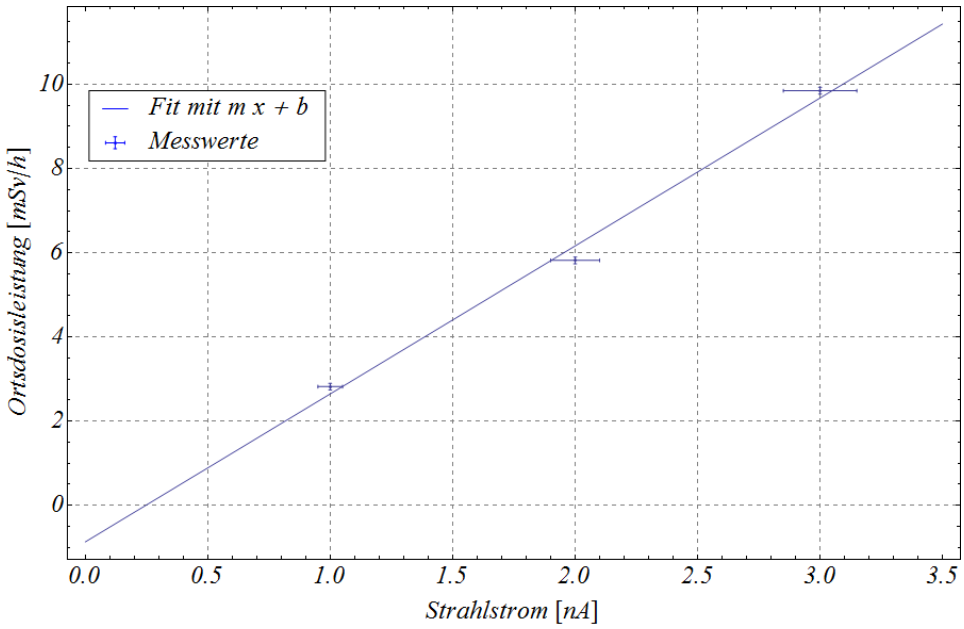

Abbildung 9: Ortsdosisleistung als Funktion des Strahlstrom. Messpunkte für höhere Strahlströme konnten auf Grund des maximalen Messbereichs des Dosimeters nicht aufgenommen werden.

3.5 Messung zur Untersuchung der Abhängigkeit des Signalstroms vom Strahlstrom

Da man nun weiß, dass die Ionisationskammer ab einem geringen Strahlstrom von wenigen Nanoampere anfängt ein messbares Signal zu liefern, gilt es nun, zu prüfen wie das Ausgangssignal zum Strahlstrom ansteigt. Dazu variiert man den Strahlstrom und misst den Spannungsabfall über dem Multimeter, welchen man durch den Innenwiderstand in einen Strom umrechnet. Zu Beginn der Messung wurde ein Offsetstrom von 4.57 nA gemessen, welcher in den folgenden Werten herausgerechnet wurde. Um die Werte anzufitten wird zunächst ein linearer Ansatz verwendet, da dieser der theoretischen Erwartung entspricht. Die angepasste Gerade gibt die Messwerte allerdings nicht exakt wieder. Dies wird auf eine Sättigung des Signalstrom zurückgeführt. Um dieses Verhalten zu beschreiben wird deshalb ein neuer Ansatz mit $a \cdot x^b$ verwendet. Der somit erstellte Fit in Abb. 10 beschreibt die Messwerte innerhalb ihrer gewählten Fehler. Die Sättigung wird dadurch begründet, dass mit zunehmendem Strahlstrom die Stromdichte im Messvolumen der Ionisationskammer zunimmt. Diese Zunahme führt zu einem geringeren Feld und begünstigt somit die Rekombination der geladenen Teilchen.

Variable	Wert	Standardabweichung
a	0.0286	0.0006
b	0.899	0.002

Tabelle 2: Fitparameter zur Ausgleichsfunktion $a \cdot x^b$

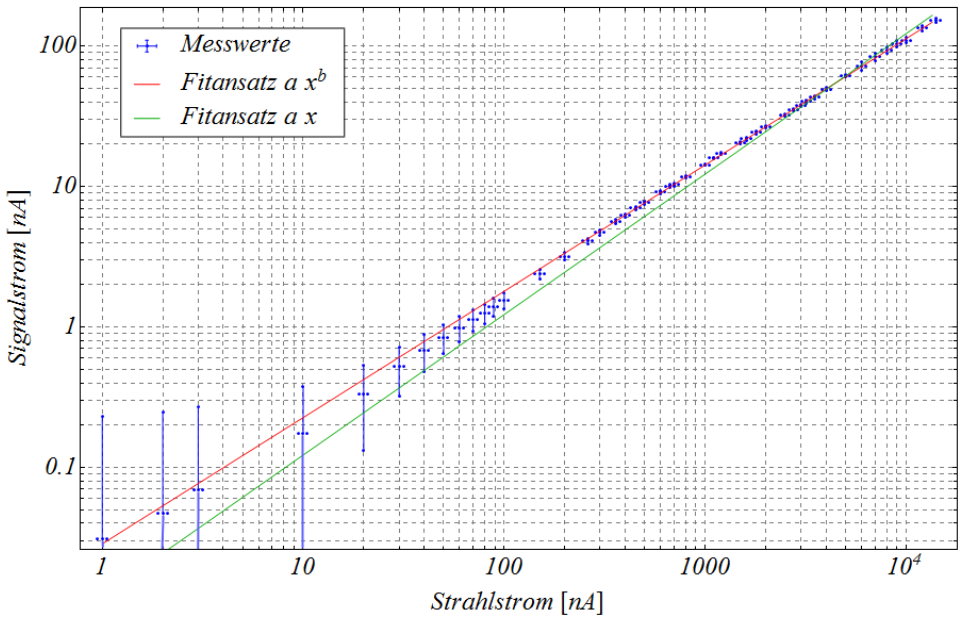

Abbildung 10: Die Abbildung zeigt die Abhängigkeit des Signalstroms vom Strahlstrom. Laut Theorie würde man einen linearen Zusammenhang erwarten. Bei der Messung stellt sich allerdings heraus, dass es mit zunehmenden Strahlstrom zu einer Sättigung kommt. Man verwendet deshalb einen neuen Ansatz mit variablen Exponenten.

3.6 Ergebnisse des Vorversuchs

Der Vorversuch zeigt, dass die Vorversuchskammer für die Messung von Strahlung geeignet ist. Die Kammer besitzt einen hohen Dynamikbereich der vier Größenordnungen abdeckt. Es zeigen sich erste erkennbare Wertänderungen ab einem Strahlstrom von einem Nanoampere. Die Messwerte sind mit einem zeitlich variierenden Offset belastet, den es in der neuen Kammer zu unterdrücken gilt. Man hat weiter einen Sättigungseffekt des Signals festgestellt, den es ebenfalls zu minimieren gilt.

4 Planung und Konstruktion der ortsauflösenden Ionisationskammer

Es gilt nun, mit den Erkenntnissen aus dem Vorversuch eine ortsauflösende Ionisationskammer zu bauen. Um dieses Ziel zu erreichen, muss man die Platten sektionieren. Die Idee ist es je zwei Plattenpaare für jede Raumrichtung der zur Strahlrichtung senkrecht liegenden Ebene, in die Kammer einzubauen, wie in Abb. 11 gezeigt. Zwischen diesen Plattenpaaren soll sich dann eine weitere Platte (im Folgenden Vollplatte genannt) befinden, welche sich auf der Betriebsspannung befindet, um ein elektrisches Feld zu erzeugen. Anhand der verschiedenen Signalströme der einzelnen Platten kann man so die Position des Strahls bestimmen.

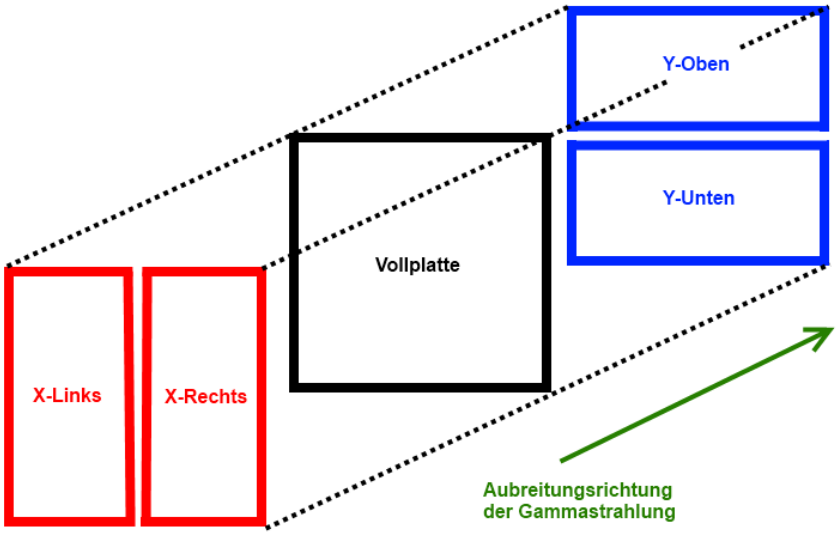

Abbildung 11: Schema zur Plattenanordnung. Das rote Plattenpaar wird zur Bestimmung der X-Position verwendet und das blaue zur Bestimmung der Y-Position. Die schwarze Platte dazwischen wird benötigt, um ein elektrisches Feld zu erzeugen. Die Gammastrahlung bewegt sich senkrecht zu den Plattenebenen durch das Messvolumen.

Für eine solche Anordnung ist das Design der Vorversuchskammer nicht mehr geeignet. Um eine stabile Halterung der Platten zu gewährleisten, würde man für jede der einzelnen vier Platten je zwei Haltestäbe benötigen und somit das Messvolumen reduzieren. Im neuen Design wird deshalb

auf Haltestäbe verzichtet. Stattdessen wird ein Plastikquader mit Schlitzen entworfen, in welche die einzelnen Platten an je zwei Enden eingeschoben werden. Da die Plastikhalterung auch isoliert, kann man diese auch stapeln, ohne dass die Platten zueinander im elektrischen Kontakt stehen. Um die einzelnen Schichten miteinander zu verbinden, befinden sich in den Plastikhalterungen Bohrungen, durch die eine Plastikgewindestange geführt wird. An den Enden der Stange werden dann jeweils Muttern aufgeschraubt. Um die Anzahl der verschiedenen Bauteile gering zu halten, werden die Plastikhalterungen so entworfen, dass sowohl zwei Ortsplatten nebeneinander eingeschoben werden können als auch eine Vollplatte.
Die Platten werden mit einem kleinen Rechteck mit einer Durchbohrung versehen. So können später die anzuschließenden Kabel einfacher und stabiler an die Platten gelötet werden.

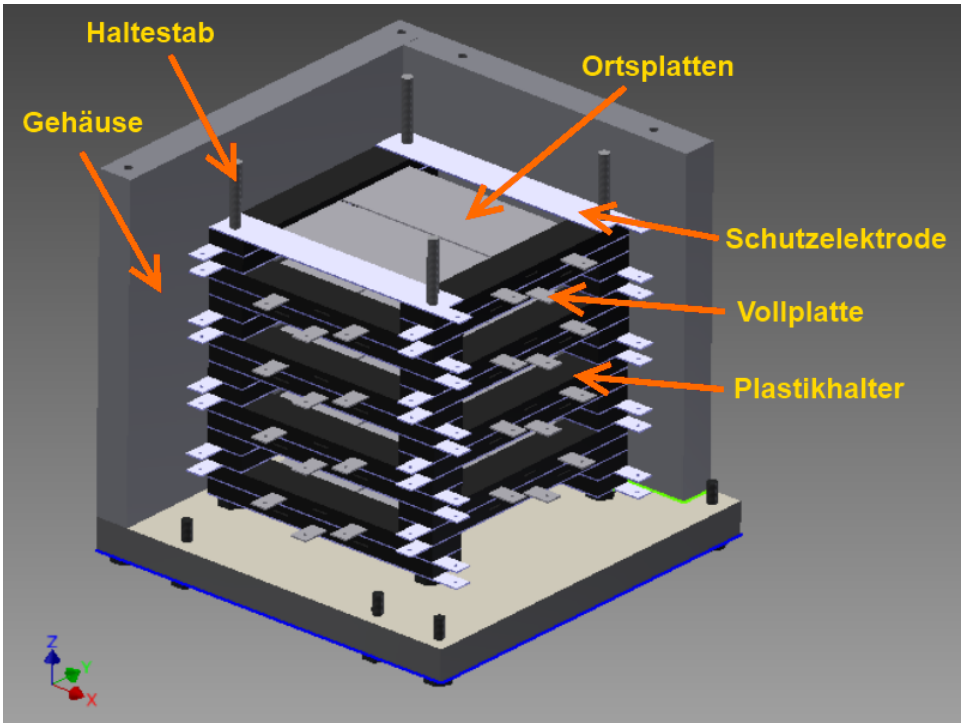

Abbildung 12: 3D-Modell der Ionisationskammer. Im Bild sieht man die schwarzen Plastikhalterungen, welche in der Höhe abwechselnd eine Vollplatte und ein Ortsplattenpaar tragen. Zwischen zwei Halterungen befindet sich je eine Schutzelektrode. Die Halterungen werden durch Gewindestangen zusammengehalten. Diese sind im Gehäuse befestigt, welches die Kammer abschirmen soll. Die überstehenden Teile sind für die elektrische Kontaktierung vorgesehen.

Im Vorversuch konnte man einen zeitlich veränderlichen Offsetstrom beobachten. Um diesen zu unterdrücken, werden in die Ionisationskammer Schutzelektroden eingebaut. Diese Elektroden befinden sich zwischen den Isolatoren der Vollplatten und Ortsplatten. Der Zweck dieser Schutzelektroden ist es die Ströme, die durch die Isolierungen der Platten fließen, abzuleiten, sodass diese von den Messgeräten nicht detektiert werden.

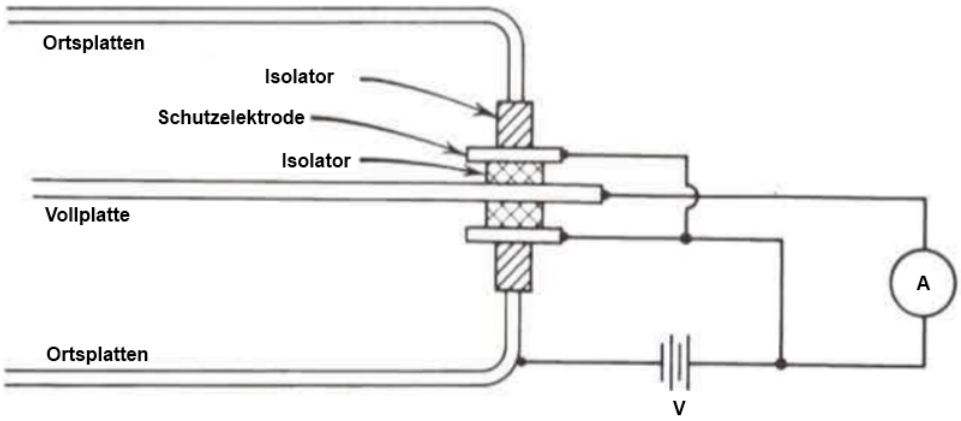

Abbildung 13: Schnitt durch eine zylindrische Ionisationskammer mit Schutzelektroden. Diese befinden sich zwischen Anode und Kathode. Sie sollen verhindern, dass ein Strom, der über die Isolierung abfließt, gemessen wird. [Kno10]

Die Schutzelektroden werden in der neuen Kammer die Form der Plastikhalterungen haben, sodass diese zwischen ihnen platziert werden können. Die Elektroden werden ebenfalls mit Bohrungen versehen, durch die man die Kabel führen und verlöten kann.

Um die Kammer vor äußeren Einflüssen abzuschirmen, wird ein Metallgehäuse entworfen. Die Plastikgewindestangen, welche die Halterungen miteinander verbinden, werden länger verbaut, als für den inneren Aufbau nötig. So kann mit den Stangen der innere Aufbau an dem Gehäuse fixiert werden.

Die Kammer benötigt fünf Anschlüsse, einen für die Versogungsspannung und je einen für die vier Ortsplatten. Da die Kammer trotzdem möglichst klein bleiben soll, wird für den Ausgang der Signale ein neunpoliger Sub-D-Stecker in die Gehäusewand geschraubt. Dieser ist kleiner als fünf separate BNC-Stecker. Um die Ausgangssignale aus der Beschleunigerhalle in den MAMI-Kontrollraum weiterleiten zu können, wird ein Adapter von Sub-D auf fünf BNC-Kabel gebaut.

Bei der Dimensionierung des Messvolumens orientiert man sich an der Größe der Vorversuchskammer. Da man nun vier anstatt einer Platte hat, erwartet man bei gleichem Messvolumen ein Viertel des Signals pro Platte. Um im Bereich niedriger Spannungen zu bleiben, gilt es auch, die Plattenabstände in etwa gleich denen der Vorversuchskammer zu halten. Für eine ortsauflösungsfähige Ionisationskammer benötigt man zumindest ein Modul aus vier Ortsplatten und einer Vollplatte. Zur Vergrößerung des Messvolumens werden vier solcher Module mit je einer weiteren Vollplatte hintereinander verbaut. Die Platten in der gleichen Ortsrichtung werden für den Versuch parallel geschaltet. Dies führt zu einem stärkeren Ausgangssignal. Die fertig geplanten Teile werden in der Werkstatt des Instituts für Kernphysik in Auftrag gegeben. Nach der Herstellung der Teile werden diese eingepasst, zusammengebaut und verlötet. Die Abmessungen der neuen Kammer sind:

Gehäusehöhe:	125 mm
Gehäusebreite:	112 mm
Gehäusetiefe:	112 mm
Höhe des Messvolumens:	87 mm
Breite des Messvolumens:	51 mm
Plattenabstand:	5.1 mm

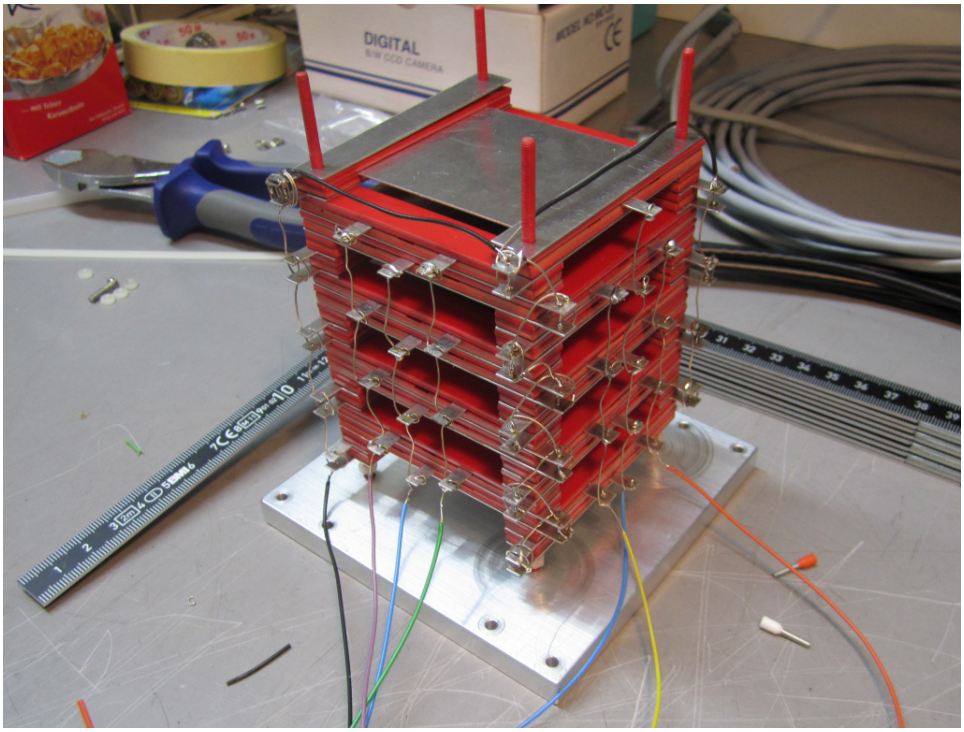

Abbildung 14: Zusammengebaute und verlötete Ionisationskammer ohne Gehäuse. Die Kabel wurden für eine sichere Kontaktierung einmal um die Kontaktstelle gedreht und schließlich verlötet.

5 Versuche mit der ortsauflösenden Ionisationskammer

5.1 Versuchsaufbau

Die neue Kammer wird ebenfalls, wie in Abb. 15 zu sehen ist, hinter den Endflansch der Strahlführung 35 gestellt. Dabei wird darauf geachtet die Kammer möglichst mittig zur dünn gedrehten Stelle des Flansches auszurichten, um einen Nulldurchgang des Strahls durch die Kammermitte beobachten zu können. Zwischen Endflansch und Kammer befindet sich ein Bleiradiator. Um eine zusätzliche Information über die Strahlposition zu erhalten steht die Kammer nicht direkt am Flansch, sodass man den fluoreszierenden Streifen erkennen kann. Der Durchmesser der Gammastrahlenverteilung beträgt daher bei Eintritt in die Ionisationskammer $d = 2.0\,\mathrm{cm}$.

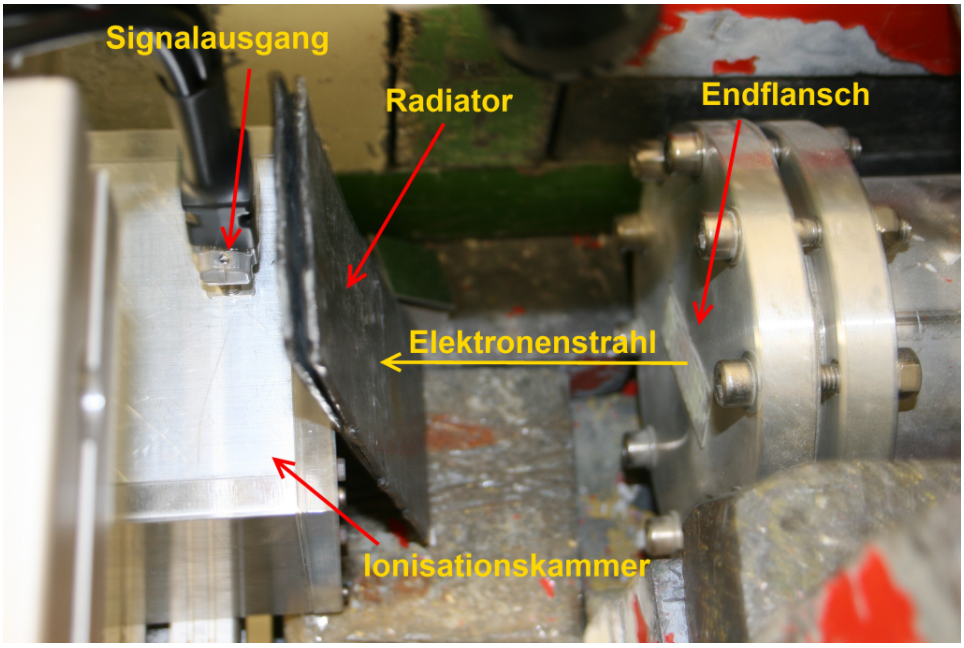

Abbildung 15: Versuchsaufbau am Ende der Strahlführung. Der Bleiradiator steht zwischen der Ionisationskammer und dem Strahlrohr. Auf dem Endflansch ist ein fluoreszierender Streifen angebracht, welche die dünn gedrehte Stelle markiert und auf den die Kammer ausgerichtet wird.

Um die Kammer mit Spannung zu versorgen und die Messsignale aus der Kammer zu leiten, verwendet man den gebauten Adapter und stellt eine Verbindung der fünf ausgehenden BNC-Kabel zum MAMI-Kontrollraum her (siehe Abb. 16). Dort befinden sich die Multimeter und das Netzgerät. Jedes der Plattensignale wird über ein seriell geschaltetes Multimeter mit der Masse verbunden. Die Schutzelektroden werden direkt mit der Masse

verbunden. Die Vollplatten liegen auf der angelegten Betriebsspannung. Für den Versuch werden zwei Agilent 34401A und zwei Metra Hit 30M Multimeter verwendet. Um den Innenwiderstand der Multimeter über die Messung konstant zu halten, wird der Messbereich der Multimeter auf manuell geschaltet und über den Versuch konstant gehalten. Dadurch ist gewährleistet, dass der Umrechnungsfaktor von Spannung zu Strom für alle Messungen gleich bleibt. Der Innenwiderstand der Agilent-Multimeter wird auf $R_A = 10.0\,M\Omega \pm 1\%$ bestimmt und der Widerstand der Metra Hit Multimeter auf $R_M = 11.1\,M\Omega \pm 1\%$.

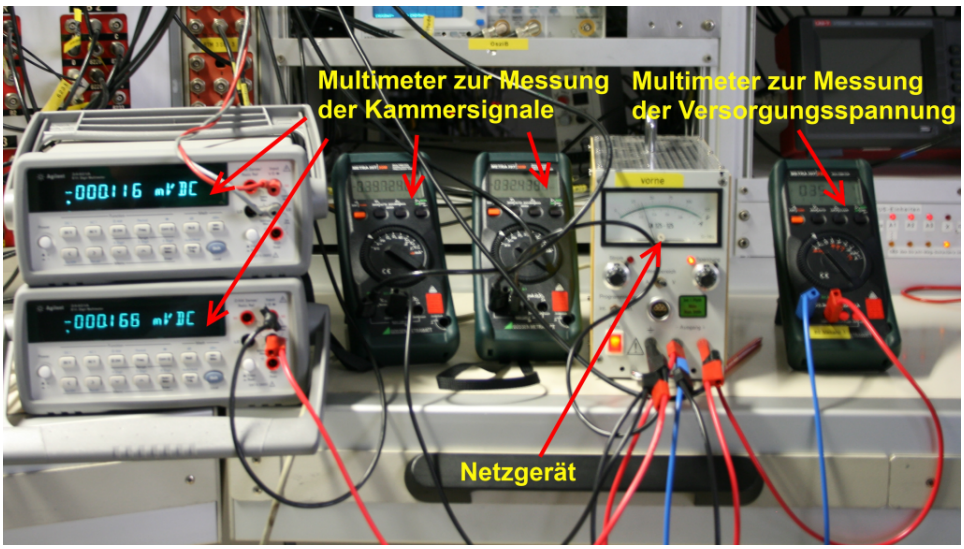

Abbildung 16: Messdatenerfassung und Spannungsversorgung im MAMI-Kontrollraum. Jedes der vier Multimeter misst ein Ausgangssignal. Ein weiteres Multimeter wird zur Überwachung der angelegten Versorgungsspannung verwendet.

5.2 Ermittlung einer geeigneten Betriebsspannung

Zunächst gilt es, eine geeignete Betriebsspannung für die Ionisationskammer zu ermitteln. Dazu stellt man einen festen Strahlstrom ein und variiert die Versorgungsspannung von 0 V bis 125 V, wobei 125 V die maximale Ausgangspannung der verwendete Spannungsquelle ist. In Abb. 17 sieht man die Summe aller vier Kammerströme in Abhängigkeit der Versorgungsspannung für drei unterschiedliche Strahlströme. Man erkennt, dass sich die Sättigung des Kammerstroms mit zunehmender Strahlungsintensität in Richtung einer höheren Versorgungsspannung verschiebt. Um die Betriebsspannung nun zu wählen, wird eine möglichst ebene Stelle im Plateaubereich gewählt, sodass

eventuelle Schwankungen der Versorgungsspannung einen möglichst niedrigen Einfluss auf die Messung haben. Deshalb wird eine Betriebsspannung von 120 V festgelegt, was einer Feldstärke von E=23.5 $\frac{kV}{m}$ entspricht.

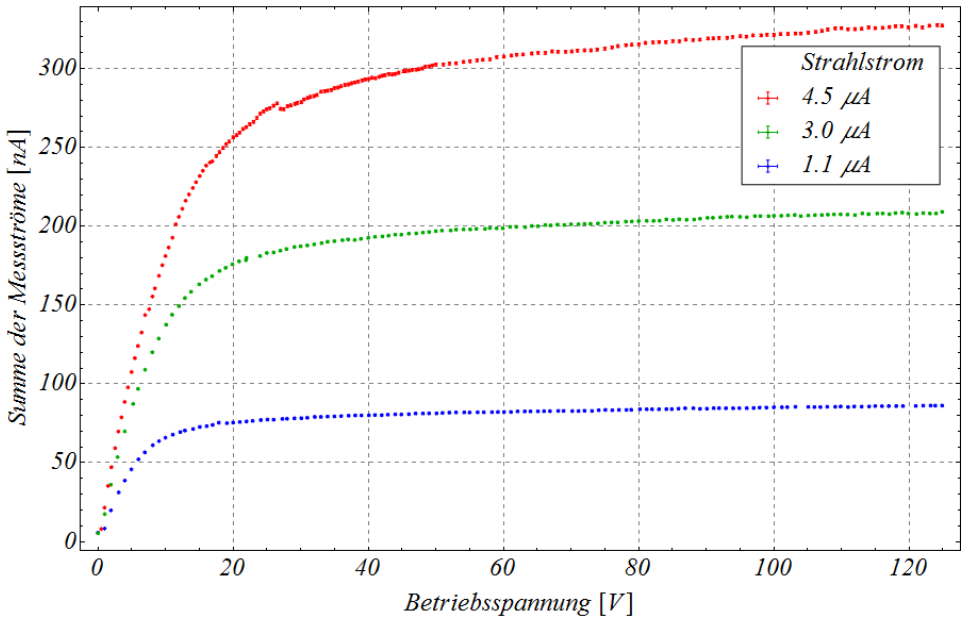

Abbildung 17: Messung zur Festlegung einer geeigneten Betriebsspannung. Dazu wird ein konstanter Strahlstrom eingestellt und die Versorgungspannung von 0 V bis auf 125 V variiert. Dies wird für drei verschiedene Strahlströme durchgeführt. Man sieht, dass sich je nach angelegter Spannung ein Sättigungsplateau einstellt.

5.3 Offsetmessung

Die neue Ionisationskammer besitzt gegenüber dem Vorgängermodell nun die bereits beschriebenen Schutzelektroden. Diese sollen auf ihre Wirkung getestet werden. Dazu wird die Betriebsspannung der Ionisationskammer von 120 V angelegt und die Ausgangssignale gemessen. Der Offsetstrom wird in Abb. 18 einmal mit und einmal ohne Schutzelektroden gegen die Zeit aufgetragen. Bei den Messwerten ohne Schutzelektrode sieht man einen Offsetstrom von 0.24 nA der über einen Zeitraum von 15 Minuten auf 0.20 nA abfällt. Mit den angeschlossenen Schutzelektroden dagegen reduziert sich der Offsetstrom auf 0.01 nA und bleibt im Rahmen der Messgenauigkeit konstant. Der Offset kann somit in den folgenden Messungen gegenüber der Größe der Messwerte vernachlässigt werden, wenn man die Schutzelektroden verwendet.

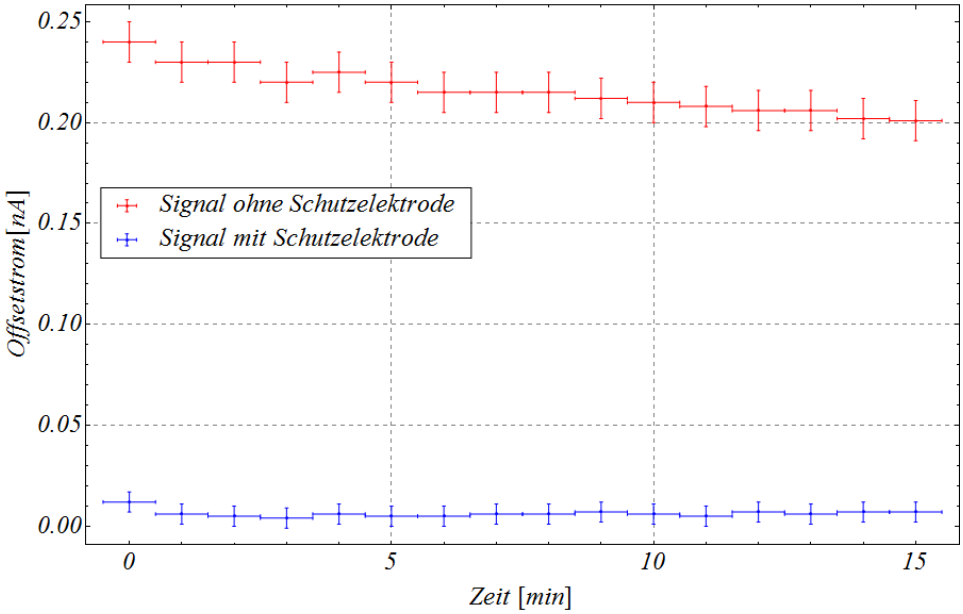

Abbildung 18: Plattensignal mit und ohne Schutzelektrode. Man sieht, dass der Offsetstrom ohne Schutzelektrode in 15 Minuten von 0.24 nA auf 0.20 nA absinkt. Mit Schutzelektrode beträgt dieser nur noch 0.01 nA und bleibt im Rahmen der Messgenauigkeit konstant.

5.4 Messung zur Untersuchung der Abhängigkeit des Signalstroms vom Strahlstrom

Es wird überprüft wie die Ausgangssignale der Kammer vom Strahlstrom abhängen. In Abb. 19 ist die Summe aller vier Signalströme gegen den Strahlstrom aufgetragen. Die Werte werden dabei wieder mit der Ausgleichsfunktion $a \cdot x^b$ angepasst.

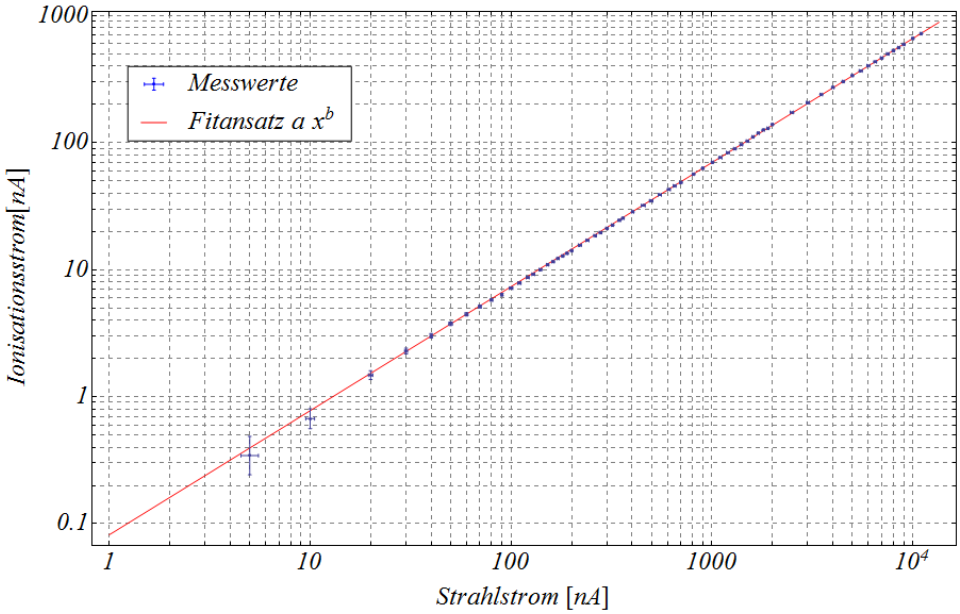

Abbildung 19: Summe aller Signalströme gegen den Strahlstrom. Die einzelnen Kammerströme werden addiert und gegen den Strahlstrom aufgetragen. Im Vergleich zur Vorgängerkammer mit einem Exponenten von 0.899 liegt der Exponent der neuen Kammer mit 0.976 näher am theoretischen Wert von 1. Dies liegt daran, dass die neue Kammer mit einer höheren Betriebsspannung betrieben wurde. Die Vorgängerkammer dagegen wurde am Rande des Plateaubereichs betrieben, was zu einem stärkeren Abfall des Signalstroms führt, wenn das Feld durch den Ionisationsstrom reduziert wird.

Variable	Wert	Standardabweichung
a	0.0891	0.0007
b	0.976	0.001

Tabelle 3: Fitparameter zur Ausgleichsfunktion $a \cdot x^b$

Im Vergleich zur Ionisationskammer des Vorversuchs mit einem Exponenten von 0.899 sieht man, dass der Exponent nun mit 0.976 näher am theoretischen Wert von 1 liegt. Dies liegt daran, dass bei der neuen Kammer sicher gestellt ist, dass man sich bei der Messung im Plateaubereich befindet. Die Vorgängerkammer dagegen war mit einer angelegten Spannung von 30 Volt bei etwa gleichen Plattenabstand am Rande des Plateaus. Aus diesen Grund führt eine Reduzierung der Feldstärke schneller zu einem Abfall des Signalstroms. Durch das doppelte Messvolumen der neuen Kammer ist die Stromdichte zudem nur halb so groß wie bei der Vorgängerkammer bei gleichem Signalstrom.

5.5 Ermittlung der Lageempfindlichkeit

Die Position des Elektronenstrahls kann mittels verschiedener magnetischer Elemente manipuliert werden. Abbildung 20 zeigt schematisch die Strahlführung 35. Vom rechten Rand aus kommen die 3.5 MeV Elektronen vom Linearbeschleuniger ILAC. Zur Verschiebung des Strahls in horizontaler Richtung wird der Dipolmagnet 4 verwendet und zur Verschiebung in vertikaler Richtung der Wedler 4. Der Beamdump am Ende der Strahlführung wird umgebaut, sodass man dort die Ionisationskammer platzieren kann.

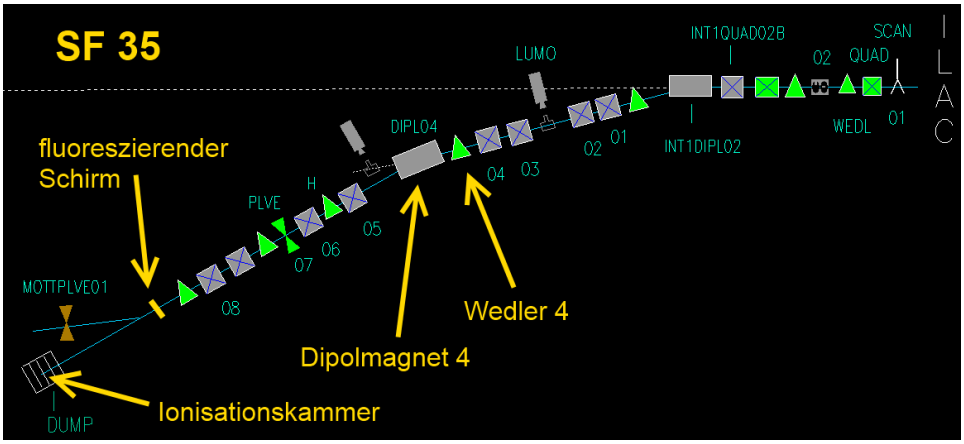

Abbildung 20: Schema der Strahlführung von ILAC bis zur Ionisationskammer. Die Elektronen werden mit Hilfe des ILAC auf 3.5 MeV beschleunigt und werden dann von rechts kommend bis zur Ionisationskammer geführt. Für eine Verschiebung des Strahls in der Horizontalen wird der Dipolmagnet 4 verwendet und zur Verschiebung in der Vertikalen der Wedler 4. Vor der Ionisationskammer befindet sich ein fluoreszierender Schirm, welcher zur Ortsbestimmung verwendet wird.

Um die Position des Teilchenstrahls in der Strahlführung zu bestimmen, ist es notwendig eine Ortskalibrierung an einem fluoreszierenden Schirm durchzuführen. Dieser Schirm befindet sich im Strahlrohr, weshalb man ihn mittels einer Kamera beobachten muss. Das Kamerabild wird auf einen Monitor übertragen, auf welchem man die Strahlposition markieren kann. Um den Abstand, den man auf den Monitor sieht, in den tatsächlichen umzurechnen, bedarf es eines Umrechnungsfaktors. Eine Bewegung von einem Zentimeter auf dem Monitor entspricht 1.130 Millimeter in der Strahlführung. Dieser Wert wird dadurch bestimmt, dass der Schirm in Schritten von 0.1 mm verschoben werden kann. Die Werte auf dem Monitor können dann schließlich per Hand auf ein Blatt Papier übertragen werden, welches in Abb. 21 dargestellt ist.

Um das Papier immer an die gleiche Stelle anlegen zu können, wurde zudem das Gitter, welches auf dem fluoreszierenden Schirm aufgetragen ist, ebenfalls abgezeichnet.

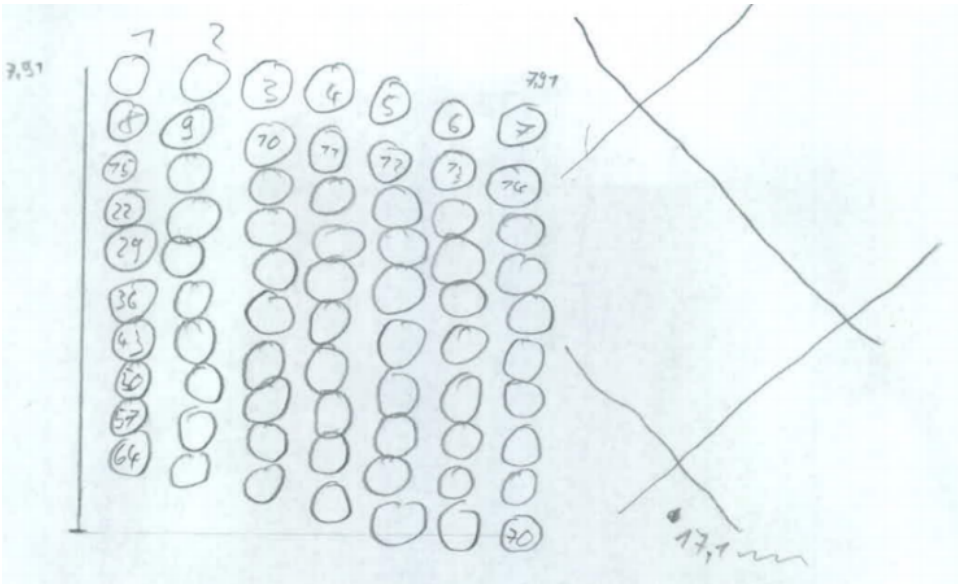

Abbildung 21: Messung zur Positionsbestimmung. Die Kreise markieren die verschiedenen Positionen des Strahls. Um das Blatt immer an der gleichen Stelle des Monitors anlegen zu können wurde das auf den Schirm aufgetragene Gitter mit übertragen.

5.5.1 Vertikale und horizontale Auslenkung

Um zu testen ob man überhaupt eine Auslenkung an den Plattensignalen erkennen kann, wird der Elektronenstrahl einmal vertikal und einmal horizontal verschoben. Dabei wird ein Strahlstrom von 500 nA verwendet. Um eine Verschiebung des Strahls anhand der Daten zu erkennen, wird die Differenz eines Plattenpaares auf deren Summe zu normiert.

$$A_x := \frac{X_{Rechts} - X_{Links}}{X_{Rechts} + X_{Links}} \quad ; \quad A_y := \frac{Y_{Oben} - Y_{Unten}}{Y_{Oben} + Y_{Unten}}$$

Diese Werte werden in Abb. 22 für eine horizontale Bewegung des Strahls und in Abb. 23 für eine vertikale Bewegung gegen den Ort aufgetragen.

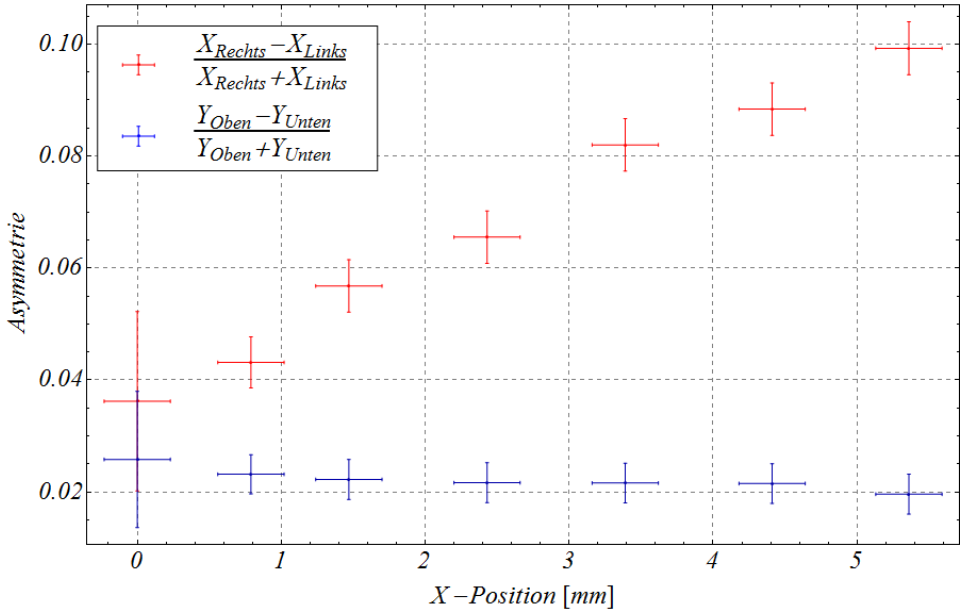

Abbildung 22: Auslenkung des Strahls in der Horizontalen. Man sieht, dass sich die horizontale Asymmetrie ändert. Da die Höhe konstant gelassen wird, bleibt die vertikale Asymmetrie konstant.

Wie in Abb. 22 zu sehen ist, kommt es bei einer horizontalen Auslenkung zu eine Änderung der horizontalen Asymmetrie. Da die vertikale Position des Strahls während des Versuchs konstant gelassen wird, sieht man entsprechend einen konstanten Verlauf der vertikalen Asymmetrie. Würde die Differenz der einzelnen X-Signale Null ergeben, so wäre die Asymmetrie ebenfalls Null und der Strahl befände sich in der Mitte zwischen den beiden X-Platten. Anhand der Definition der horizontalen Asymmetrie erkennt man, dass die Gammastrahlung primär auf der rechten Plattenseite ankam. Die horizontale Mittellinie der Kammer liegt außerhalb des gemessenen Bereichs. In Abbildung 23 sieht man, ein entsprechend entgegengesetzt Verhalten. Hier kommt es bei einer Bewegung in der Vertikalen zu einer Änderung der vertikalen Asymmetrie. Die horizontale Position wird konstant gehalten, was dazu führt, dass das Verhältnis der X-Plattensignale zueinander konstant bleibt. In der Höhe von etwa 5.5 mm kommt es zu einen Nulldurchgang. In dieser Höhe befindet sich die vertikale Mittellinie der Kammer. Aus dem Versuch wird gefolgert, dass man anhand der Plattensignale eine Verschiebung des Strahls feststellen kann. Man stellt eine Veränderung der Asymmetrie von 1 % pro verschobenen Millimeter fest. Um diese Steigung zu erhöhen, kann man die Ionisationskammer näher an den Endflansch der Strahlführung

positionieren. Das führt dazu, dass der Elektronenstrahl sich aufgrund der Streuung im Flansch weniger stark ausdehnt bis er im Bleiradiator konvertiert. Somit ist die Gammastrahlungsverteilung im Messvolumen kleiner und man stellt eine größere Asymmetrie fest.

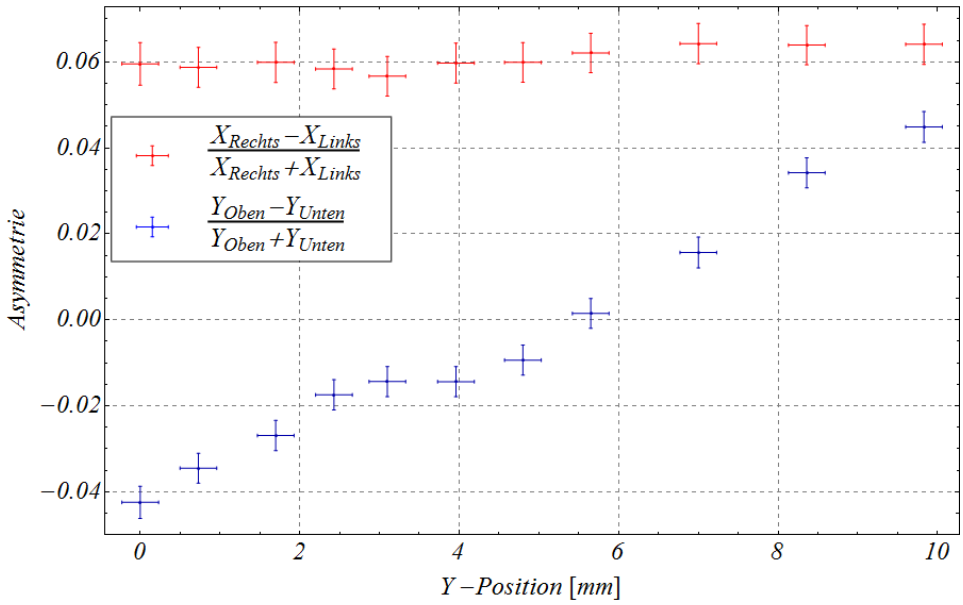

Abbildung 23: Auslenkung des Strahls in der Vertikalen. Man sieht ein zu Abb. 22 entgegengesetztes Verhalten. Bei einer vertikalen Bewegung, kommt es zu einer Änderung der vertikalen Asymmetrie. Das Verhältnis der X-Plattensignale bleibt dagegen konstant.

5.5.2 Rastermessung

Bei den bisherigen Versuchen war auffällig, dass die Kammersignale stark abfallen, sobald die Strahlposition außerhalb eines bestimmten Bereichs liegt. Um dies näher zu untersuchen wird eine Rastermessung durchgeführt, bei der man mit dem Strahl die zum ihm senkrecht stehende Ebene abtastet. In den Beschleunigerhallen befinden sich zur Sicherstellung des Maschinenschutzes mehrere Strahlungsdetektoren, Ioso (Ionisationssonde) genannt. Um einen Vergleichswert für die mit der Ionisationskammer gemessene Strahlung zu erhalten wird deshalb die von der Ionisationssonde gemessene Ortsdosisleistung notiert. Der verwendete Detektor befindet sich auf Beschleunigerachse des RTM1 hinter dem Strahlrohr. Betrachtet man die Summe aller gemessenen Kammerströme in Abb. 24 und die Messwerte des Ioso-Detektors in Abb. 25 in Abhängigkeit der Strahlposition, so erkennt man mit beiden Detektoren einen Randbereich, an dem der Signalstrom bzw. die Ortsdosisleistung abfällt. An diesen Randbereich gehen die Signale

innerhalb von einen Millimeter um über 50 % zurück. In der unteren linken Ecke in Abb. 25 sieht man im Gegensatz zur Ionisationskammer einen Anstieg des Signals auf bis zu 200 %.

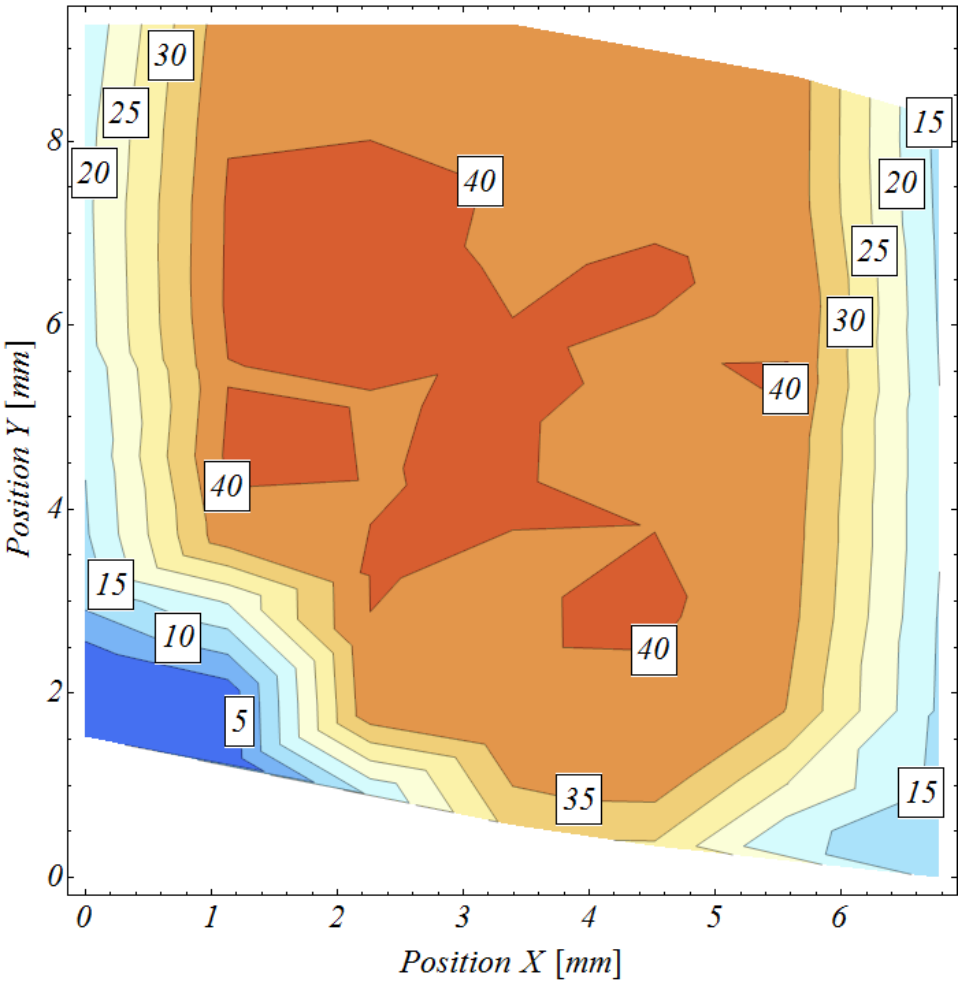

Abbildung 24: Summe aller Signalströme in Abhängigkeit des Ortes in nA. In der Mitte des Bildes sieht man einen Bereich mit hoher Signalstärke. Verlässt man diesen so fällt das Signal um über 50 % innerhalb eines Millimeters.

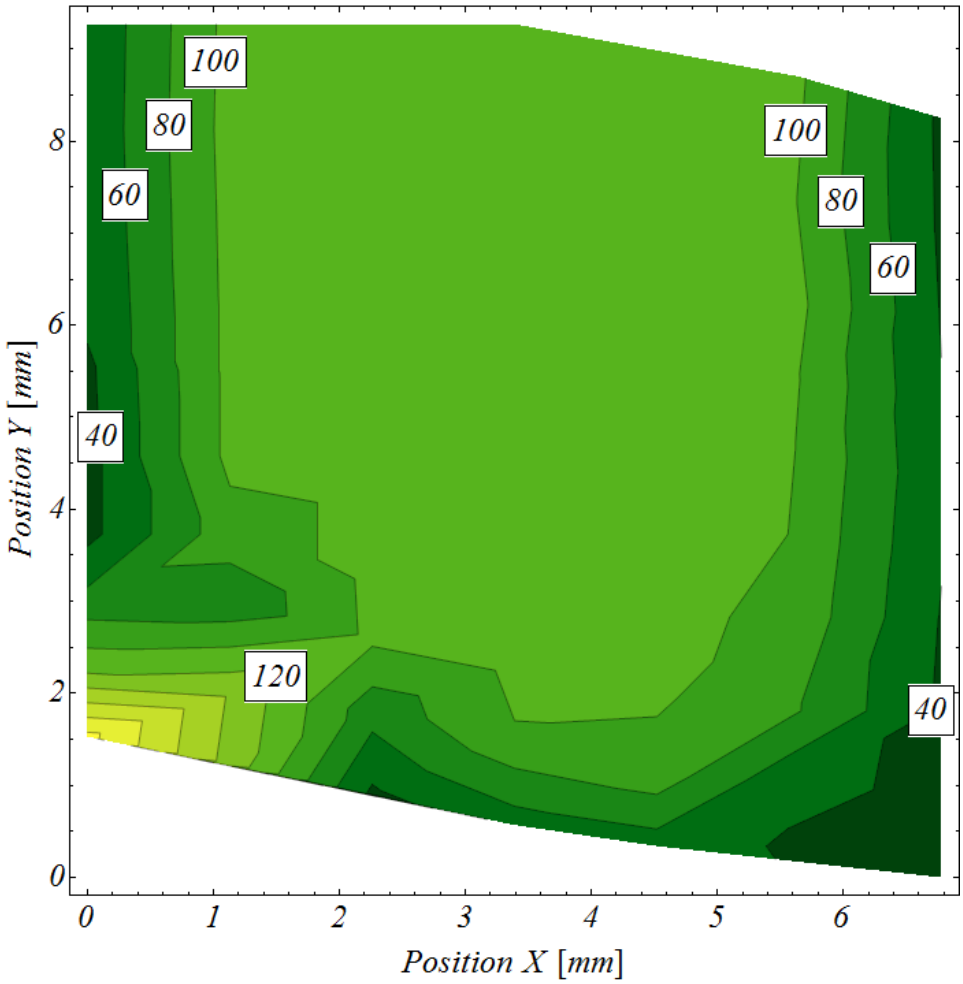

Abbildung 25: Gemessene Ortsdosisleistung des Ioso-Detektors in Abhängigkeit des Ortes in $\mu Sv/h$.Die Daten sind zu den Messdaten der Ionistaionkammer konsistent. Auch hier fällt das Signal außerhalb des zentralen Bereichs innerhalb von einem Millimeter um 50 %. In der unteren linken Ecke sieht man im Gegensatz zur Ionisationskammer eine um bis zu 200 % erhöhte Strahlung.

Der Elektronenstrahl tritt am Ende der Strahlführung über den Endflansch aus. Geschieht dies nicht über die dünn gedrehte Stelle, konvertieren die Elektronen nicht mehr im Bleiradiator sondern im Aluminium des Abschlussflansches. Da die kritische Energie von Aluminium größer ist als die von Blei, entsteht weniger Gammastrahlung, was zu einem geringeren Messsignal in den Detektoren führt.
Im linken, unteren Bildabschnitt von Abb. 25 sieht man einen starken An-

stieg der Ortsdosisleistung. Man vermutet, dass man hierbei den Lift des Mott-Experimentes trifft. Dieser ist bei Strahlbetrieb auf eine bestimmte Position gefahren, sodass der Strahl durch ihn hindurchfliegen kann. Lenkt man den Strahl nun allerdings zu weit aus seiner optimalen Flugbahn aus, trifft dieser auf den Lift. Dadurch ensteht Gammastrahlung, welche von dem Ioso-Detektor gemessen wird, aber nicht mehr auf die Ionisationskammer trifft. Diesen Fleck findet man ebenfalls in den folgenden Abbildungen 26 und 27.

Mit den durch die Rastermessung gewonnenen Messdaten ist es nun auch möglich einen dreidimensionalen Plot der vorausgegangenen Messung zu erstellen. Dazu wird wieder die Differenz von zwei Signalen eines Ortsplattenpaares gebildet und diese durch deren Summe geteilt. In Abb. 26 ist die horizontale Asymmetrie gegen den Ort aufgetragen. Man sieht eine Veränderung der horizontalen Asymmetrie, wenn man den Strahl horizontal bewegt. Bewegt man den Strahl vertikal, so bleibt das Verhältnis der Plattensignale zueinander konstant. Am linken Rand der Abbildung sieht man bei $x = 0.7\,\mathrm{mm}$ den Nulldurchlauf durch die mittlere X-Plattenlinie. Dort sind die beiden Signale des Ortsplattenpaares gleich groß.

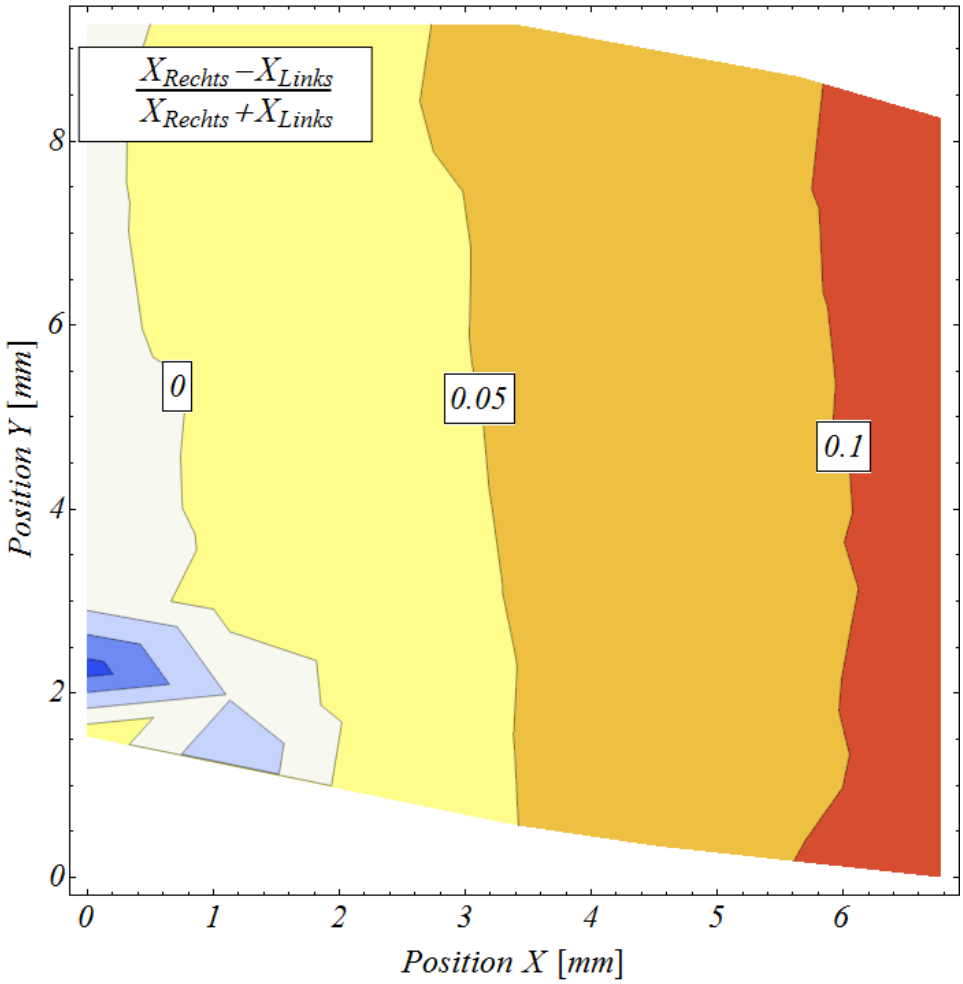

Abbildung 26: Horizontale Asymmetrie in Abhängigkeit des Ortes. Die Asymmetrie verändert sich, wenn man den Strahl horizontal bewegt und bleibt konstant, wenn man den Strahl in der vertikalen bewegt. Der X-Nulldurchgang befindet sich bei $x = 0.7\,\mathrm{mm}$.

In Abb. 27 ist die vertikale Asymmetrie aufgetragen. Man sieht eine Änderung, sobald man die Höhe des Strahls verändert und ein konstantes Verhalten, wenn man ihn in X-Richtung bewegt. In der Mitte des Bildes befindet sich bei $y = 4.5\,\mathrm{mm}$ der Nulldurchgang durch die Mittellinie der Y-Plattenpaare. Bewegt man den Elektronenstrahl auf den Schnittpunkt der beiden Mittellinien, so hat man den Strahl auf das Zentrum des Messvolumens ausgerichtet.

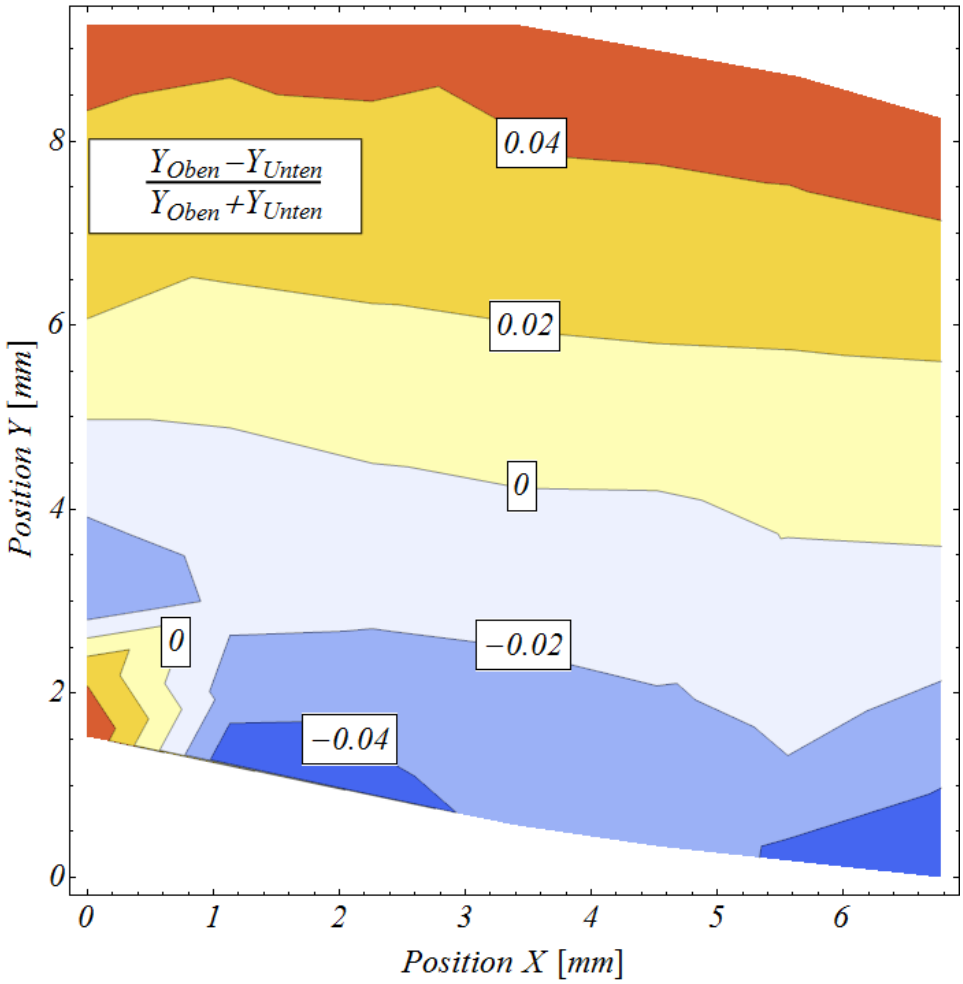

Abbildung 27: Vertikale Asymmetrie in Abhängigkeit des Ortes. Man sieht eine Änderung der Asymmetrie, wenn man die Strahlhöhe verändert und ein konstantes Verhalten, wenn man den Strahl in X-Richtung bewegt. In der Mitte der Abbildung bei $y = 4.5\,\mathrm{mm}$ befindet sich der Y-Nulldurchgang. Im Schnittpunkt der Y- und X-Durchgänge befindet sich das Zentrum des Messvolumens.

Um ein stärkeres Signal zu erhalten wird während dem Versuch der Gehäusedeckel der Ionisationskammer entfernt, sodass die Strahlung ohne durch das 10 mm starke Aluminiumgehäuse auf das Messvolumen trifft. Tatsächlich erhält man nach Abnahme des Deckels bei gleichen Strahlstrom ein sechs mal so starkes Signal. Normiert man diese Werte allerdings wie zuvor, so sieht man in Abb. 28, dass die vorher klar erkennbaren Durchgänge in der neuen Messung verzogen werden. Diese Messung zeigt, dass das Gehäuse als Abschirmung für die Positionsbestimmung notwendig ist.

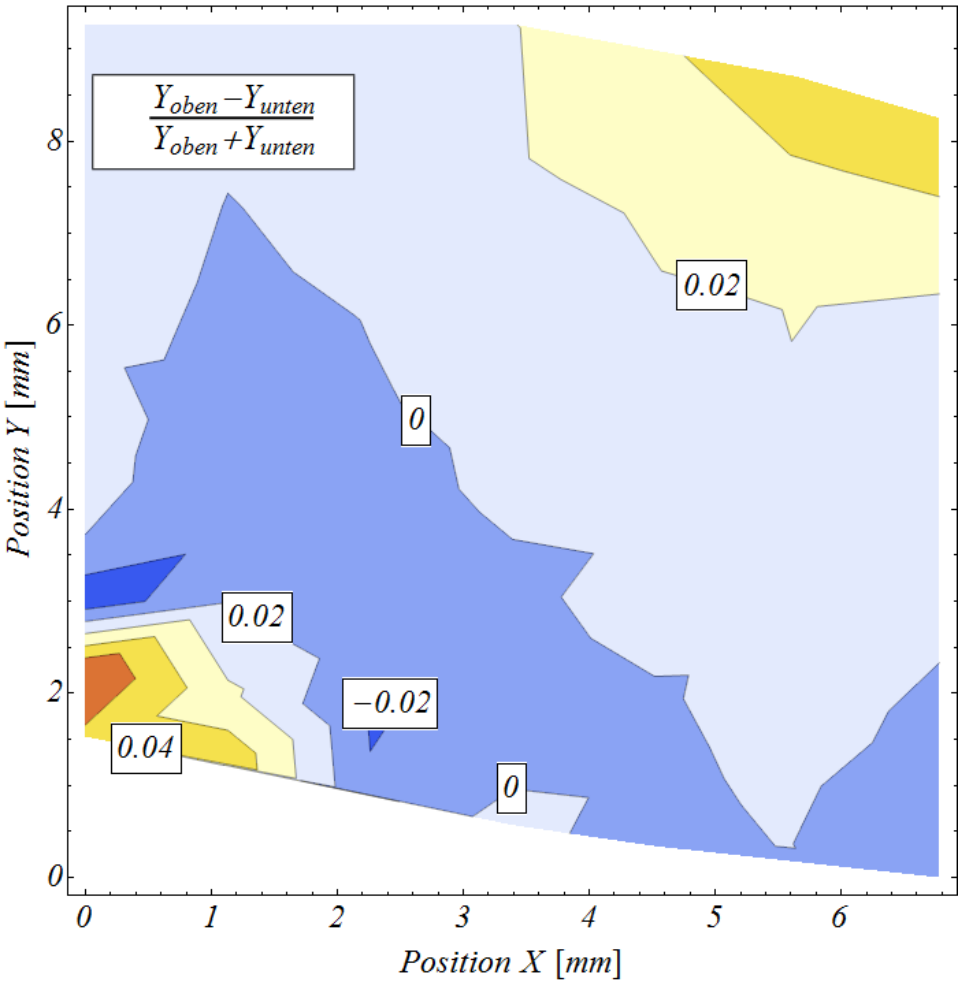

Abbildung 28: Vertikale Asymmetrie in Abhängigkeit des Ortes ohne Gehäusedeckel. Vergleicht man diese Abbildung mit der Abb. 27, so sieht man, dass die vorher klar erkennbaren Isolinien nun verzerrt sind.

6 Ergebnisse und Ausblick

Im Rahmen dieser Arbeit wurde ein funktionsfähiger Detektor konstruiert, welcher reproduzierbare Messwerte liefert. Dieser besitzt einen hohen Dynamikbereich von vier Größenordnungen. Somit ist es möglich Ortsdosisleistungen in Bereichen zu messen, welche andere Messgeräte nicht mehr messen können. Die Ionisationskammer ist fähig die Strahlposition zu lokalisieren. Die Empfindlichkeit der Positionbestimmung liegt bei 1 mm in horizontaler und vertikaler Richtung. Diese wird durch die Genauigkeit der Messung des Ionisationsstroms limitiert. Durch die Verwendung von Schutzelektroden ist es nicht nur gelungen den Offsetstrom der Kammer konstant zu halten, sondern auch auf einen Bruchteil zu reduzieren. Der nächste Schritt ist es nun einen Stromstärke-Frequenz-Wandler zu bauen. Durch das neue Gerät wird es möglich sein die Messwerte direkt digital zu erstellen. An der Kammer selbst könnte man noch einige kleine Verbesserungen vornehmen. Um die Signalausbeute zu erhöhen, könnte man das Gehäuse an der Eindringstelle der Gammastrahlung ähnlich wie den Endflansch der Strahlführung ausdünnen. Dieser ist zur Zeit an der entsprechenden Stelle 10 mm dick. Mit der Verwendung einer zweiten, bereits erprobten Kammer könnte man zudem eine Kalibrationsmessung bezüglich dem Verhältnis der einfallenden Strahlung zum ausgehenden Signalstrom durchführen.

7 Appendix

7.1 Abbild der Gammastrahlungsverteilung

Mit Hilfe der gewonnenen Messdaten aus der Rastermessung ist es möglich ein Abbild der Verteilung der Gammastrahlung zu erstellen. Dazu trägt man die Asymmetrien

$$A_x := \frac{X_{Rechts} - X_{Links}}{X_{Rechts} + X_{Links}} \quad ; \quad A_y := \frac{Y_{Oben} - Y_{Unten}}{Y_{Oben} + Y_{Unten}}$$

in der Form

$$-\sqrt{A_x^2 + A_y^2}$$

über den Ort auf.

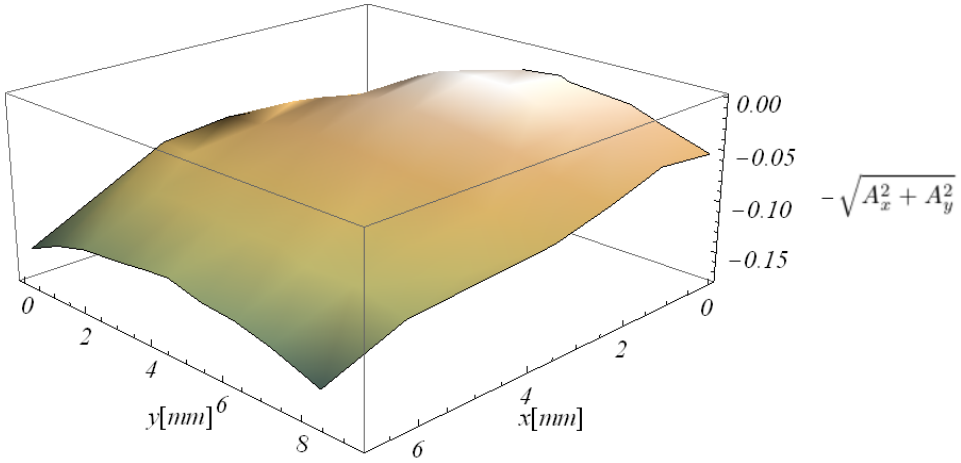

Abbildung 29: Aus Messwerten erstellte Abbildung der Verteilung der Gammastrahlung.

7.2 Danksagung

Schlußendlich will ich mich bei all den Menschen bedanken, die mich bei dieser Arbeit unterstützt haben. Ich danke Dr. habil. Kurt Aulenbacher für die Aufgabenstellung dieser Bachelorarbeit, sowie für die hervorangende Betreuung. Danke an Herrn Dipl. Phys. Fabian Nillius, der mir nicht nur mit seinem umfangreichen Fachwissen geholfen hat, sondern sich auch zwei lange Nächte mit mir um die Ohren schlug, um die Messungen an der Kammer durchzuführen. Ebenso möchte ich mich bei allen Mitgliedern der B2-Gruppe bedanken, die bei Fragen immer ein offenes Ohr für mich hatten. Weiter gilt mein Dank Herrn Karl-Heinz Luzius und seinem Team, die mit ihrer extrem schnellen Produktion der Kammerbauteile diese Arbeit überhaupt erst in dem geforderten Zeitrahmen ermöglichten. Außerdem will ich mich bei Lorenz Ripka für seinen Rat bei Computerproblemen bedanken.

7.3 Literaturverzeichnis

Literatur

[Ale10] Alexander, Igor C.: *Frequenzverdopplung von hochfrequenz-synchronisierten Diodenlasern zur Erhöhung der Lebensdauer der MAMI-Photoquelle, Diplomarbeit.* 2010.

[Kno10] Knoll, Glenn F.: *Radiation detection and measurement.* Wiley, New York [u.a.], 4. ed. Auflage, 2010.

[Kri11] Krieger, Hanno: *Strahlungsmessung und Dosimetrie*, 2011.

[Leo94] Leo, William R.: *Techniques for nuclear and particle physics experiments : a how-to approach ; with 40 tables and numerous worked examples.* Springer, Berlin [u.a.], 2., rev. ed. Auflage, 1994. Literaturverz. S. [359] - 369.