

Zerstörungsfreie Strahldiagnosemethode in starken Magnetfeldern

Institut für Angewandte Physik - Universität Frankfurt
Arbeitsgruppe: Nicht Neutrale Plasmen

Bachelorarbeit
Adem Ates

Betreuer:
Prof. Dr. U. Ratzinger
Dr. M. Droba

12. März 2012



Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
1.1	Motivation	1
1.2	Methode der Strahlendiagnose	1
2	Die Photodiode	2
2.1	Charakterisierung der Photodiode	2
2.2	Versuchsaufbau für Messungen mit einer Photodiode	3
3	Versuchsdurchführung mit einer Photodiode	4
3.1	Rest- und Streulicht sowie Variation der Messumgebung	4
3.2	Variation des Restgasleuchtens	5
4	Simulation des Detektors	9
4.1	Azimuthale und radiale Bewegung des simulierten Strahls	9
4.2	Variation des Durchmessers und Intensität des simulierten Strahls	11
4.3	Variation der Winkelakzeptanz der simulierten Detektoren	13
4.4	Variation der Auflösung des simulierten Detektors	13
5	Entwicklung des Detektors	15
6	Kalibrierung des Detektors	19
6.1	Datenerfassungssystem	19
6.2	Kalibrierung mit Hilfe eines Leuchtstabes	20
6.3	Kalibrierung mit Hilfe der Geißler-Röhre	27
7	Messung mit Ionenstrahl	31
8	Zusammenfassung und Ausblick	34
9	Literaturverzeichnis	38

1 Einleitung

1.1 Motivation

An der Goethe Universität in Frankfurt wird ein Konzept für ein magnetostatischen Hochstromspeicherring für Protonen- und Ionenstrahlen entwickelt und untersucht. Zur Zeit stehen dem Experiment zwei Toroidsegmente und eine Volumenionenquelle zur Verfügung. An diesem Aufbau werden Experimente mit dem Ziel die Strahldynamik zu untersuchen und die Strahldiagnose in toroidalen Magnetfeldern zu entwickeln, durchgeführt [Joshi]

Für Experimente ist eine Strahldiagnose entlang der starken toroidalen Magnetfelder bis maximal 0,6 T nötig. Dabei sind die zur Verfügung stehenden Strahldiagnoseverfahren zum Einen ein Faraday-Cup und zum Anderen ein entlang des kompletten Aufbaus beweglicher Szintillatordetektor. Der Szintillatordetektor, besteht aus einem Phosphorschirm und einer Kamera, die hinter dem Schirm angebracht ist. [Nonn] Aufgrund der geschlossenen Ringgeometrie und dem Anspruch auf eine hohe Flexibilität des Detektors ist die Konstruktion eines neuen von starken Magnetfeldern unbeeinflussbaren und sehr kompakten Detektors notwendig. Ziel dieser Arbeit ist es, ein allgemeines Strahldiagnoseverfahren zu entwickeln.

1.2 Methode der Strahldiagnose

Bei dem folgend beschriebenen Detektor wird der Strahl anhand des Restgasleuchtens diagnostiziert. Das Leuchten wird von Photodioden mit Hilfe des inneren Photoeffektes detektiert und der resultierende Strom ausgelesen. Der Versuch der Detektion des Restgasleuchtens mit Hilfe von Photodioden wurde in der Arbeit von F. Sittinger bereits unternommen. [Sittinger] Diese Idee wurde nun wieder aufgegriffen und zur nicht destruktiven Strahldiagnose angewandt.

Bei Restgas Drücken von 10^{-5} mbar, wie sie auch in den Experimenten zu Hochstromspeicherring vorherrschen, kommt es beim Stromtransport immer zu begleitenden Restgasleuchten. Das Restgas im Experiment, falls kein zusätzliches Gas eingelassen wird, besteht aus Luft mit ca. 70% Anteil von Stickstoff. Es gibt zwei signifikante Reaktionen, die zu Restgasleuchten führen. Zum Einen treffen die Strahlionen auf Restgasatome und regen diese zu einem höherenergetischen Zustand an. Beim Abregen in den Grundzustand emittiert das Restgasatom ein Photon mit der Energie $E = h \cdot \nu$. Zum Anderen werden Restgasatome durch Stöße ionisiert, wobei die Restgasionen und ihre Elektronen einen Impuls erhalten und nach einer Zeit wieder rekombinieren. Schließlich emittiert das Restgasatom ein Photon.

Ein alternatives, nicht destruktives Diagnoseverfahren ist die Aufnahme des Restgasleuchtens mit Hilfe von CCD-Kameras. Jedoch können diese bei starken Magnetfeldern nicht immer eingesetzt werden. Ferner sind diese nicht flexibel genug und verbrauchen zu viel Volumen, was die Diagnose erschwert.

Deswegen wird versucht, mit um den Strahl angebrachten, Photodioden die Position und das Profil des Strahls zu untersuchen. Zunächst wurde ein Funktionstest durchgeführt. Hierzu wurden verschiedene Parameter wie Magnetfelder oder Restgasdruck variiert, um deren Einfluss auf die Photodiode zu ermitteln.

2 Die Photodiode

2.1 Charakterisierung der Photodiode

Die Photodiode wurde aus einer Vielzahl von Alternativen ausgesucht, welche die Kriterien wie magnetische Unempfindlichkeit, Kompaktheit, die Sensitivität im optischen Spektralbereich und die Kosten erfüllt.

Die Photodiode sollte nach den Anforderungen im sichtbaren Wellenlängenbereich ihre größte Empfindlichkeit besitzen. Das Restgas besteht primär aus dem Arbeitsgas, hier Wasserstoff, in der Quelle, bei dessen Anregung es Photonen der Wellenlänge im sichtbaren Bereich emittiert.

Eingesetzt wurde eine Silizium-Photodiode des Typ BPW21 vom Hersteller Osram. Dieser deckt den gesamten sichtbaren Spektralbereich ab und hat die maximale Photoempfindlichkeit bei 550 nm. Abbildung 1 zeigt die eingesetzte Photodiode. Der Vorteil an der Bauform ist, dass sie hermetisch dicht und sehr kompakt ist.

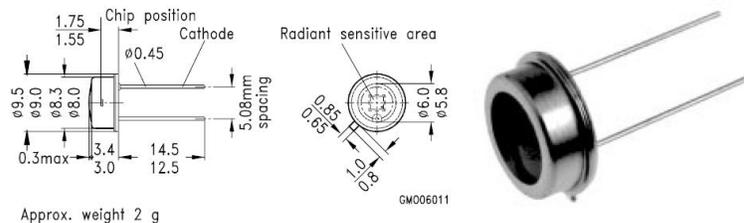


Abbildung 1: Maße und Bild der BPW21 Photodiode. [Dat]

Für den ersten Prototypendetektor wurde auch darauf geachtet, dass dieser möglichst aus einfachen und günstigen Einzelteilen besteht und das Zusammenbauen möglichst unkompliziert ist, sodass zur Optimierung des Detektors viel Freiraum besteht. Abbildung 2 zeigt die relative spektrale Empfindlichkeit und Tabelle 1 zeigt die technischen Daten der Photodiode. Der Spektralbereich der Photoempfindlichkeit liegt zwischen $\lambda = 350 \dots 820$ nm, also im optisch sichtbaren Bereich. Außerdem ist der Dunkelstrom $I_R = 2$ nA relativ gering, was ein sehr geringes Signal zu Rausch Verhältnis bedeutet.

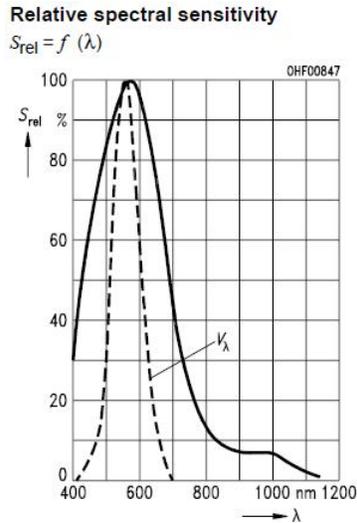


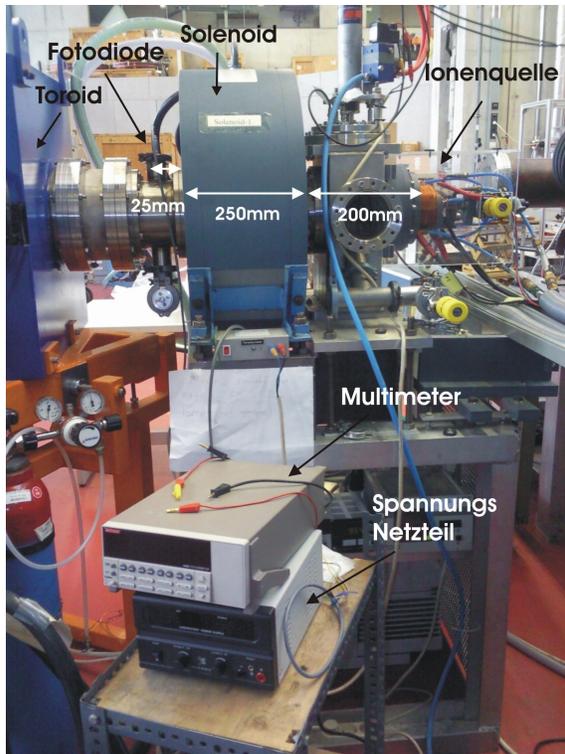
Abbildung 2: Relative spektrale Empfindlichkeit. [Dat]

Tabelle 1: Technische Daten der Photodiode. [Dat]

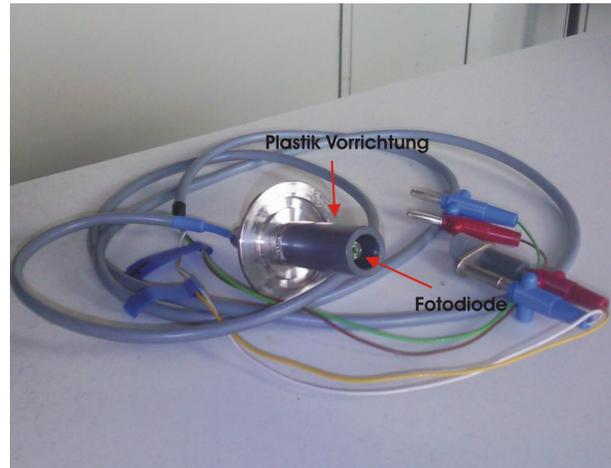
Bezeichnung	Wert
Wellenlänge der max. Photoempfindlichkeit	$\lambda_{max} = 550nm$
Spektraler Bereich der Photoempfindlichkeit	$\lambda = 350...820nm$
Spektrale Photoempfindlichkeit	$S_{\lambda} = 0,34A/W$
Quantenausbeute	$\eta = 0,8Elektron/Photon$
Dunkelstrom	$I_R = 2nA$

2.2 Versuchsaufbau für Messungen mit einer Photodiode

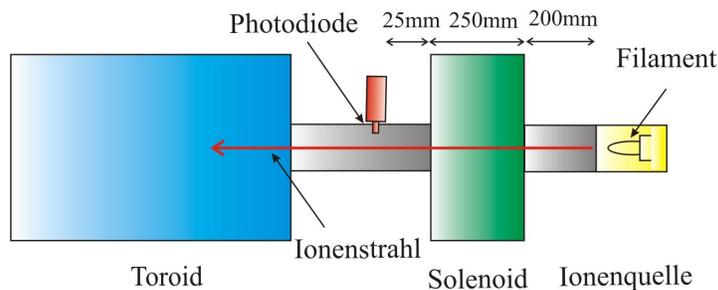
Die Photodiode wurde an einer Vakuumdurchführung installiert und um die Winkelakzeptanz möglichst gering zu halten ist eine Abschirmung aus PVC angebracht, um Aufnahmen von eventuellen Reflexionen an den Wänden des Rezipienten abzuschirmen. Die ankommenden Photonen regen die Elektronen an wodurch es zu Elektron-Loch Paaren. Der dadurch entstehende Strom wird mit Hilfe eines Pico-Ampereometers gemessen. In Abbildung 3a wird der Versuchsaufbau gezeigt, bei dem man die Ionenquelle, den Solenoiden und den Toroiden sieht, wobei die Photodiode zwischen Solenoid und Toroid installiert wurde. Die Photodiode wurde unter Einfluss von starken Magnetfeldern hier bis zu 0,6 T getestet. Ferner zeigt die Abbildung 3b die Photodiode mit der PVC-Abschirmung, die so an den Rezipienten installiert wurde, dass sie direkt auf den Strahl gerichtet werden kann.



(a)



(b)



(c)

Abbildung 3: Versuchsaufbau mit einzelner Photodiode: a) Gesamtansicht des Aufbaus b) Ansicht einer Photodiode mit PVC Abschirmung. c) Schematische Skizze des Versuchsaufbaus

3 Versuchsdurchführung mit einer Photodiode

3.1 Rest- und Streulicht sowie Variation der Messumgebung

Die an dem Experiment installierte Volumenquelle besitzt ein Filament, welches durch Thermoemission, Elektronen produziert. Das Filament wird durch einen hohen Stromfluss zum Glühen gebracht. Dieses Glühen kann man mit der Photodiode detektieren und als Lichtquelle benutzen. Der Einfluss von starken Magnetfeldern auf die Photodiode wurde wie folgt getestet.

Im ersten Versuch wurde der Strom durch das Filaments erhöht und das Signal an der Photodiode gemessen. Abbildung 4 zeigt diesen bei ausgeschaltetem und maximalem Magnetfeld am Toroid bei 0,6 T. Man sieht, dass es keine signifikante Änderung am Verlauf der Kurve gibt, die Abweichungen sind durch die Messfehler erklärbar. Der letzte Messpunkt repräsentiert maximale Leistung des Filaments bei zusätzlich maximal angelegtem Magnetfeld des Solenoiden. Dennoch ergab sich keine Änderung der Photodiodenspannung durch einschalten des Magnetfeldes.

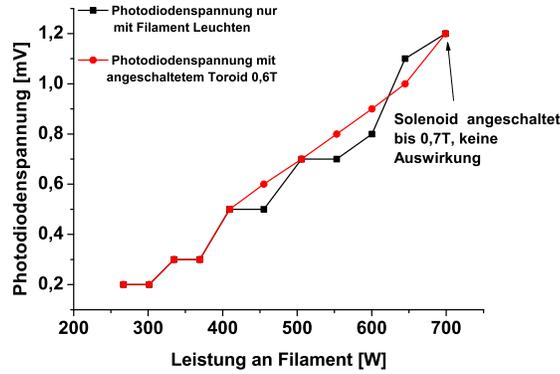


Abbildung 4: Einfluss des Filamentleuchtens und Magnetfelder.

3.2 Variation des Restgasleuchtens

Das Prinzip der Detektionsmethode ist die Detektion des Restgasleuchtens. Dazu sollte zunächst untersucht werden, ob dieses Leuchten überhaupt von der Photodiode erfasst wird. Hierzu wurde ein Strahl extrahiert mit Helium als Arbeitsgas. In den Rezipienten wurden dann Argon, Wasserstoff und Luft eingelassen und anschließend der Photodiodenstrom gemessen. Die Strahlparameter, mit denen das obige Experiment durchgeführt wurde, werden in Tabelle 2 aufgeführt.

Tabelle 2: Parametereinstellungen beim Versuch zum Restgaseinlass.

Parameter	Wert
Strahlenergie U_{ex}	6 keV
Strahlstrom I_{FC}	1,34 mA
B-Feld Solenoid B_{Sol}	0,046 T

Abbildung 5 zeigt den Strom in Abhängigkeit des Druckes bei verschiedenen getesteten Gasen.

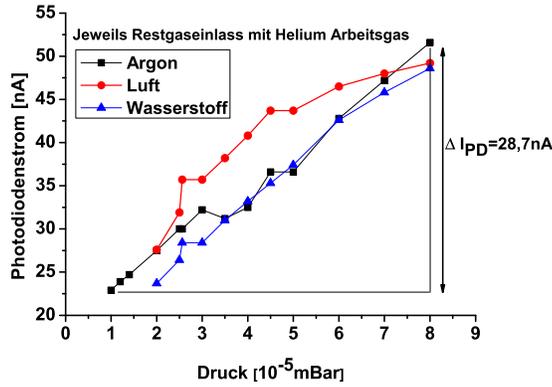


Abbildung 5: Heliumionen treffen jeweils auf Argon, Wasserstoff und Luft.

Zunächst fällt der nahezu lineare Zusammenhang zwischen dem Photodiodenstrom und dem Restgasdruck auf. Wenn man nun auf die jeweiligen Änderungen eingeht, sieht man, dass z.B. bei Argon bei einem Druckunterschied von $\Delta P = 7 \cdot 10^{-5}$ mbar sich ein Anwachsen des Photodiodenstromes um $\Delta I_{PD} = 28,7$ nA ergibt. Ferner erhält man bei einem Druck von $P = 1 \cdot 10^{-5}$ mbar noch mindestens ein Strom von $I_{PD} = 22,9$ nA. Die Experimente an den beiden Toroidsegmenten werden im Allgemeinen in dem oben genannten Druckbereich betrieben, sodass für diese Experimente die Detektion des Restgasleuchtens mit Hilfe von Photodioden möglich ist.

Abbildung 6 zeigt den Photodiodenstrom bei Variation des Magnetfeldes des Solenoiden, bei einer Strahlenergie von $U_{ex} = 10,65$ keV und einem Strahlstrom von $I_{FC} = 1,6$ mA.

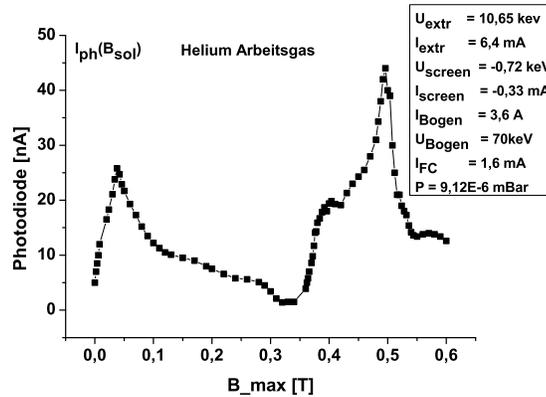


Abbildung 6: Photostrom des Diode als Funktion des B-Feldes des Solenoids bei konstanter Strahlenergie.

Man sieht an der Kurve der Abbildung 6 zwei Peaks. Der Eine liegt bei $B = 0,05$ T und der Andere liegt bei $B = 0,5$ T. Der einzige Parameter der hier variiert wird ist das

Magnetfeld des Solenoiden. Der Solenoid besitzt eine magnetische Brechkraft der den Strahl an einen Brennpunkt fokussiert. Gleichung (1) zeigt die Formel für die Brechkraft (k) des Solenoiden. Diese ist proportional zum Magnetfeld und antiproportional zum Impuls des Strahls [Hint]:

$$k = \frac{q \cdot B}{2 \cdot m \cdot v} \quad (1)$$

Mit der Brechkraft (k) und der effektiven Länge (l_{eff}) des Solenoiden erhält man für die Brennweite des Solenoiden [Hint]:

$$\frac{1}{f} = k \cdot \sin(k \cdot l_{eff}) \quad (2)$$

Zu beachten ist die effektive Länge des Solenoiden. Der Solenoid ist 250 mm lang, aufgrund der Randfelder am Solenoiden ergibt sich eine effektive Länge $l_{eff} = 174,5$ mm die zur Fokussierung relevant ist. [Maiberger]

Setzt man nun die Parameter ein für den untersuchten Helium-Strahl mit der Energie 10 keV und einer Länge von 174,5 mm, erhält man das jeweilige Magnetfeld, die in Tabelle 3 aufgeführten Brennweiten.

Tabelle 3: Brennweiten für zwei Magnetfeldeinstellungen

Magnetfeld B [T]	Brennweite f
0,05	7,65 m
0,5	11,55 cm

Zum Solenoiden muss man aber beachten, dass dieser keine dünne Linse darstellt. In Abbildung 7 ist eine dicke Linse, dessen Hauptebenen H , der Abstand z von der Hauptebene bis zum Rand der Linse und der Brennpunkt f dargestellt.

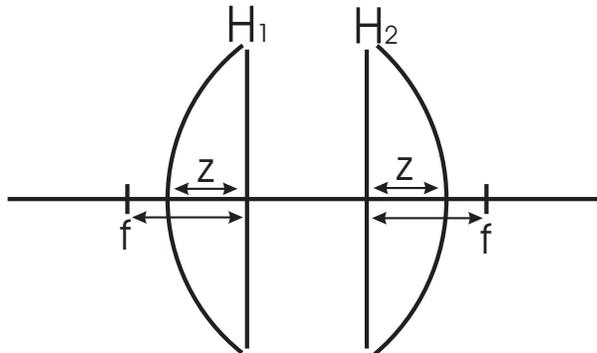


Abbildung 7: Darstellung der dicken Linse mit Hauptebenen H_1 und H_2 des Abstands von Hauptebene zum Rand der Linse z und des Brennpunkts f .

Die Hauptebenen H_1 und H_2 kann man auf eine Hauptebene H zusammen fallen lassen, wenn man den Wert von z berechnet, somit das ganze System als dünne Linse betrachtet. Die Berechnung des z -Wertes ist durch die Gleichung (3) gegeben [Hint]:

$$z = -\frac{\cos(k \cdot l_{eff}) - 1}{k \cdot \sin(k \cdot l_{eff})} \quad (3)$$

Für den Solenoiden im Experiment ergibt sich ein Wert von $z = 10,87$ cm. Daraus folgt, dass der Brennpunkt nur 6,8 mm hinter dem Rand des Solenoiden liegt bei einem Magnetfeld von $B = 0,5$ T. Diese Berechnungen sind sehr vereinfacht dargestellt, und es muss noch beachtet werden, dass der reele Strahl wegen der endlichen Emittanz nicht auf einen Punkt fokussierbar ist und die Raumladungseffekte den Strahlfokus verschieben können. Eine weitere Näherung ist, dass angenommen wurde das der Strahl parallel zum Solenoid eingestrahlt wird, wobei im realen der Strahl divergent ist. Jedoch zeigt diese Rechnung, dass der Strahl im kleinen Abstand hinter dem Solenoid fokussiert wird. Daraus folgt, dass der zweite Peak in Abbildung 6 durch die Fokussierung des Ionenstrahls an dieser Stelle hervorgerufen wird.

Desweiteren wurde die Energie des Strahls variiert, das Magnetfeld des Solenoiden mitverändert, um die Brennweite konstant zu halten. In Abb. 8 sieht man den Verlauf des Photodiodenstromes in Abhängigkeit der Strahlenergie, wobei der Strom durch die Strahlleistung geteilt wurde. Somit ist die normalisierte Leistung des Stromes in Abhängigkeit der Strahlenergie aufgetragen.

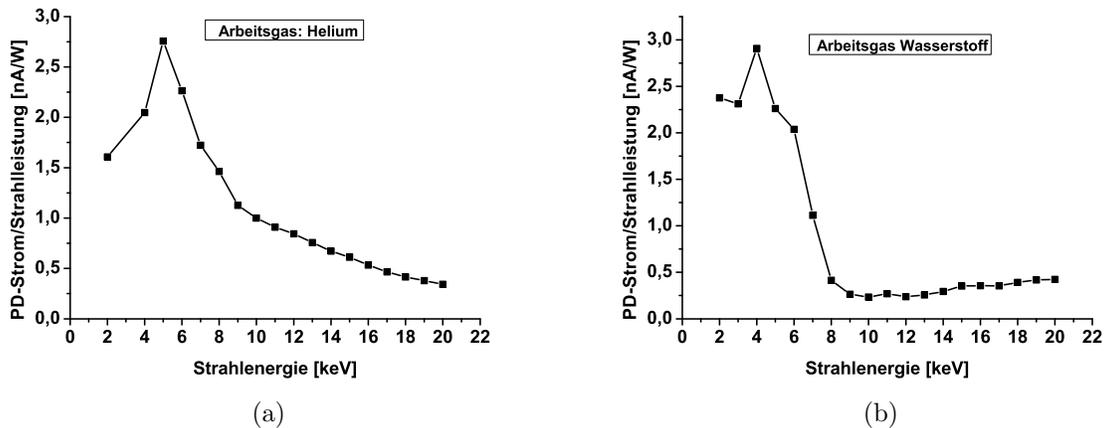


Abbildung 8: Normalisierte Leistung des PD-Stromes in Abhängigkeit der Strahlenergie: a) Helium als Arbeitsgas b) Wasserstoff als Arbeitsgas.

Das Maximum liegt bei Helium als Arbeitsgas bei 6 keV, weshalb bei dem Restgasversuch dieser Wert als Strahlenergie eingestellt wurde.

Zusammenfassend kann man nach diesen Experimenten sagen, dass die Detektion des Restgasleuchtens mit Hilfe von Photodioden möglich ist. Um zu entscheiden ob eine Anordnung der Photodioden im Kreis um den Strahl effektiv ist, wurde der Detektor simuliert und die Ergebnisse im folgenden Kapitel 4 vorgestellt.

4 Simulation des Detektors

Die Photodioden wurden im Kreis angeordnet, so dass alle radial nach innen zum Mittelpunkt gerichtet sind. Dazu wurde als Strahlungsfluss die $\frac{1}{r^2}$ Abhängigkeit als Intensitätsverteilung angenommen. Die Simulationsrechnungen bestehen aus drei Teilen. Zunächst werden ein oder mehrere Strahlen simuliert, die innerhalb der Grenzen der Photodiodenanordnung frei beweglich sind. Je nach Position des Strahls ergibt sich eine Intensitätsverteilung des Leuchtens. Die Detektoren wurden so programmiert, dass sie die Intensität nur innerhalb einer Winkeldifferenz detektieren. Variieren kann man dabei wie schon erwähnt die Position des Strahls, ferner den Durchmesser, die Anzahl der Teilchen innerhalb dieses Durchmessers und damit die Intensität des Leuchtens, zudem den zu detektierenden Winkelbereich.

Die Verteilung mehrerer unabhängiger Strahlen kann in der Simulation berücksichtigt werden und dazu ein Strahl mit unterschiedlicher Verteilung simuliert werden.

Abbildung 9a zeigt als Beispiel ein Bild des simulierten Strahls in der Mitte. Die Detektoren sind außenherum angeordnet. Abbildung 9b zeigt als Beispiel ein Bild, welche einen konstanten Wert ergibt. Das heißt, alle Photodioden geben das gleiche Signal.

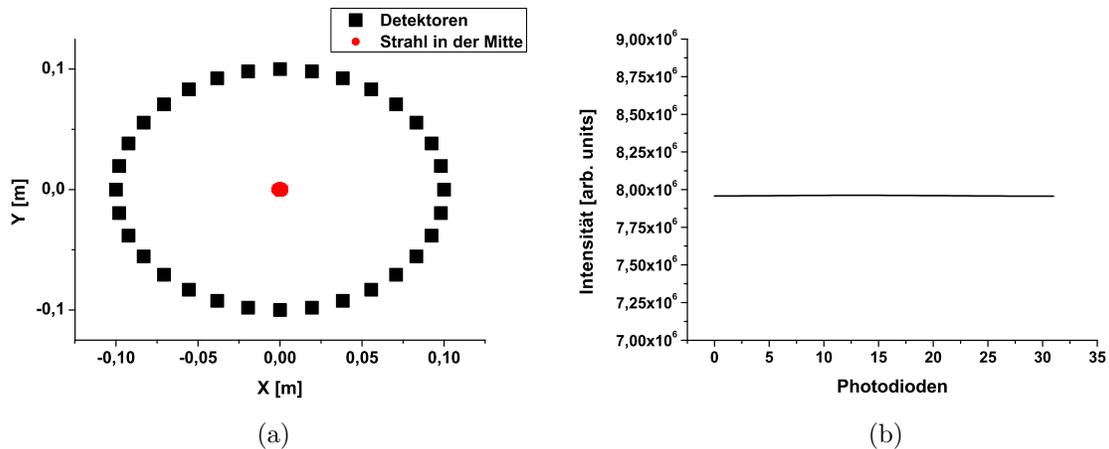


Abbildung 9: Simulierter Strahl in der Mitte: a) Simulierte Anordnung der Detektoren mit dem Strahl in der Mitte b) Simulierte Intensitätsverteilung.

4.1 Azimuthale und radiale Bewegung des simulierten Strahls

Es wurden mehrere Strahlpositionen, -intensitäten und -durchmesser eingestellt und berechnet, um zunächst die Systemigenschaften und die Auflösung zu ermitteln. Abbildung 10 zeigt die Azimut Positionsänderung im Abstand von 35,4 mm von der Mitte aus.

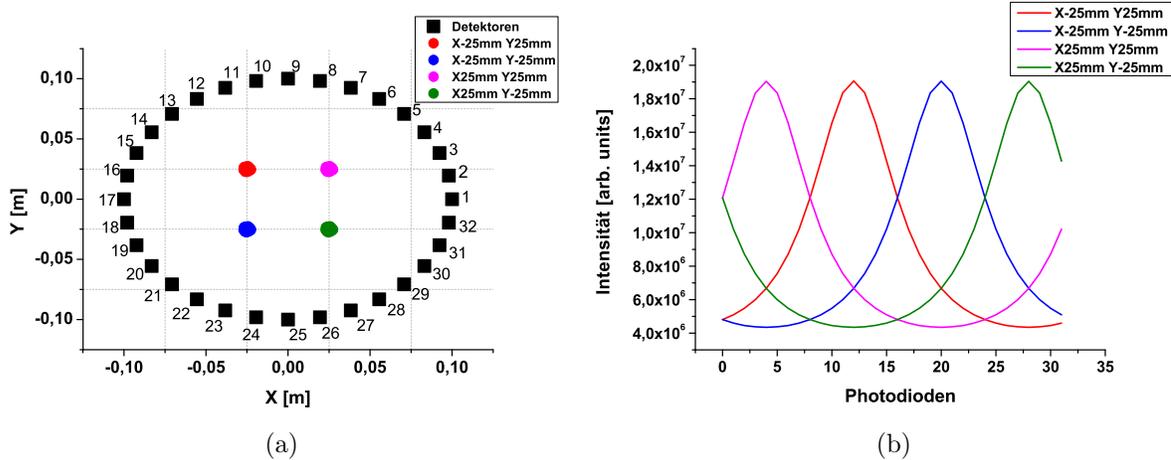


Abbildung 10: Simulierter Strahl mit azimuthaler Positionsänderung: a) Simulierte Anordnung der Detektoren mit verschiedenen Strahlpositionen. b) Simulierte Intensitätsverteilung: Simulierte Anordnung der Detektoren mit verschiedenen Strahlpositionen.

Die azimuthale Positionsänderung erkennt man an der Verschiebung der Maxima der Kurven. In dem man die Photodiode ermittelt, die die höchste Intensität an Strom produziert, kann man genau die azimuthale Position des Strahles bestimmen.

Abbildung 11 zeigt den simulierten Aufbau und das Intensitätsprofil bei radialen Positionen 25 mm, 50 mm und 70 mm.

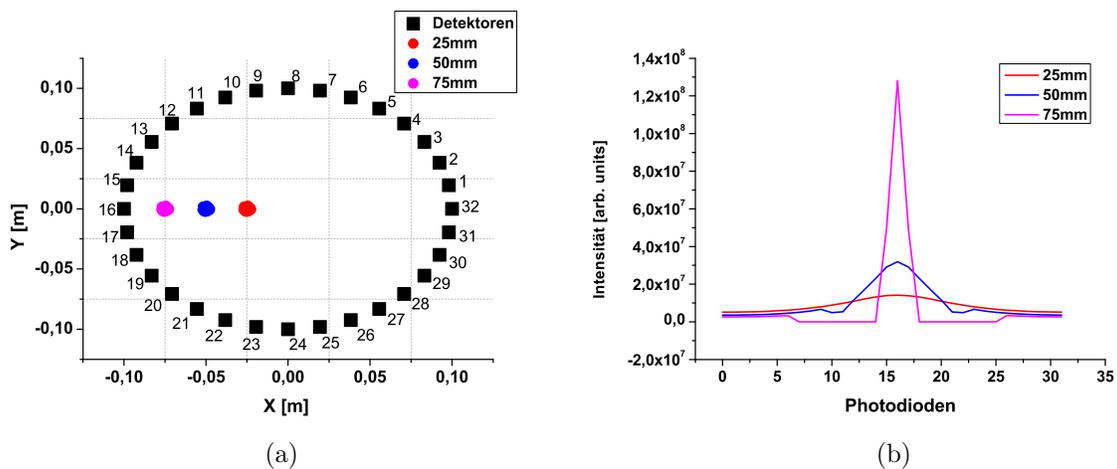


Abbildung 11: Simulierter Strahl mit radialer Positionsänderung: a) Simulierte Anordnung der Detektoren mit verschiedenen Strahlpositionen. b) Simulierte Intensitätsverteilung bei Positionen 25 mm, 50 mm und 70 mm.

Um nun die Abhängigkeit der Strahlungsintensität von der Entfernung der Lichtquelle von der Photodiode zu untersuchen, wurde diese in Abbildung 12 aufgezeichnet. Der nichtlineare Fit zeigt, dass die Strahlungsintensität mit $\frac{1}{r^2}$ von der Entfernung abhängt.

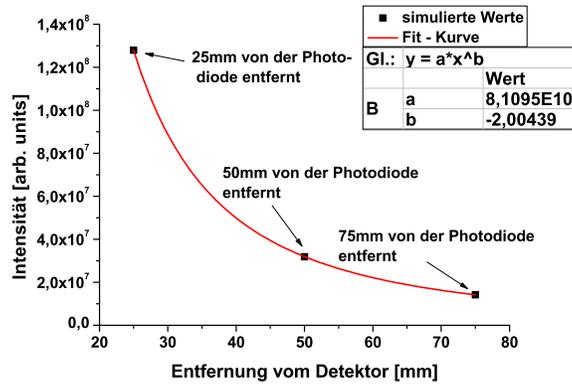


Abbildung 12: Strahlungsintensität in Abhängigkeit der Entfernung von der einzelnen Photodiode aus.

Diese Abhängigkeit war auch zu erwarten, denn in der Simulation wurde eine punktförmige Lichtquelle angenommen dessen Strahlungsintensität mit $\frac{1}{r^2}$ abfällt.

Die radiale Positionsänderung erkennt man an der Anzahl der angesprochenen Photodioden. Das heißt, je mehr Photodioden Ströme liefern, desto näher liegt die Position des Strahls in der Mitte des Detektors. Das sieht man auch an der Abbildung 9, da wenn der Strahl in der Mitte liegt, alle Photodioden gleiches Signal liefern. Wenn nur wenige Photodioden ein stärkeres Signal liefern, liegt die Position des Strahls sehr nahe an der jeweiligen Photodiode, so dass wegen der Winkelakzeptanz wenige Photodioden Photonen detektieren können.

4.2 Variation des Durchmessers und Intensität des simulierten Strahls

Während der Strahldurchmesser verändert wurde, wurde zunächst auch die Anzahl der Teilchen in der Simulation mitskaliert, um die Teilchendichte konstant zu halten. Dabei wurde mit einem Radius von 2,5 mm und 1000 Teilchen begonnen. Anschließend immer zum ursprünglichen Radius 2,5 mm hinzugefügt und zur Teilchenanzahl 1000 hinzu addiert. Abbildung 13 zeigt die Variation des Durchmessers an zwei verschiedenen Positionen.

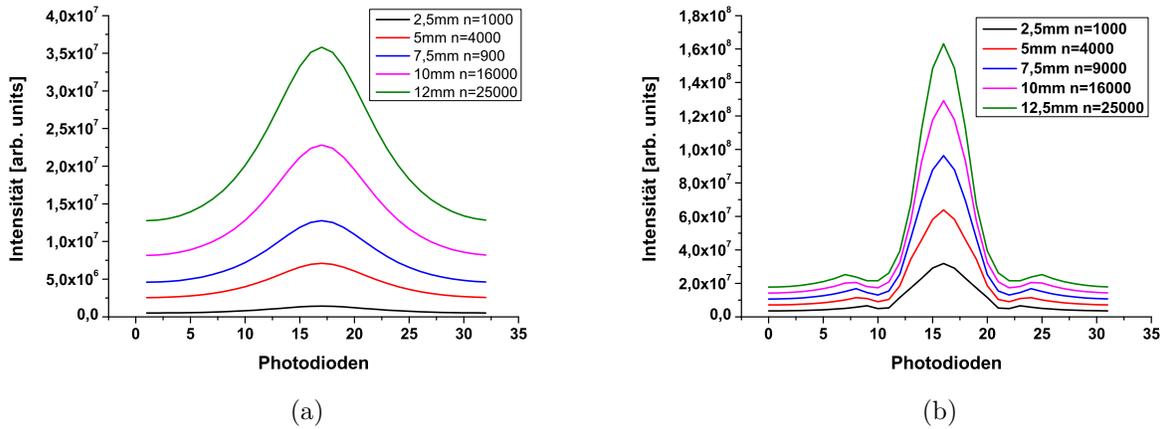


Abbildung 13: Variation des Durchmesser bei zwei verschiedenen Positionen bei homogener Dichteverteilung: a) Bei Position [25;0]. b) Bei Position [50;0].

Um die Abhängigkeit der errechneten Werte vom Durchmesser und der Intensität des Strahles zu ermitteln, wurde die Halbwertsbreite sowie das Integral unter dem Graphen der Abbildung 13 in Abhängigkeit des Durchmessers geplottet, was in Abbildung 14 gezeigt wird. Man sieht den linearen Verlauf und das Sinken der “Full Width Half Maximum” (FWHM) -Werte bedeutet, dass weniger Photodioden angesprochen wurden. Die Anzahl der angesprochenen Photodioden ist ein mögliches Maß für den Durchmesser des Strahls, wobei der Unterschied nur sehr gering ist. Dies spricht dafür, um eine bessere Auflösung zu erhalten, mehr Photodioden an den Detektor anzubringen und die Winkelakzeptanz so gering wie möglich zu halten. An dem Anwachsen der Flächenwerte erkennt man, dass die Intensität der Lichtquelle mit dem Durchmesser variiert wurde, womit die Gesamtintensität der detektierten Signale steigt.

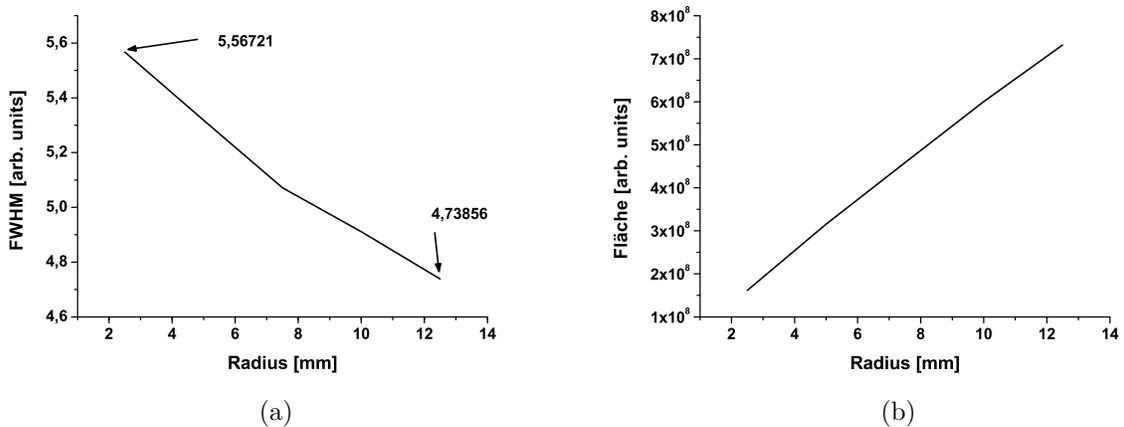


Abbildung 14: Untersuchung der Abb. 13b: a) FWHM der Graphen in Abb. 13b b) Fläche unter dem Graphen von Abb. 13b .

4.3 Variation der Winkelakzeptanz der simulierten Detektoren

Um zu ermitteln, ob eine geringere Winkelakzeptanz eine höhere Auflösung des Detektors bedeutet, wurde der Winkel innerhalb dessen Photonen detektiert werden, in der Simulationsrechnung variiert. Die Ergebnisse sind in Abbildung 15 aufgeführt.

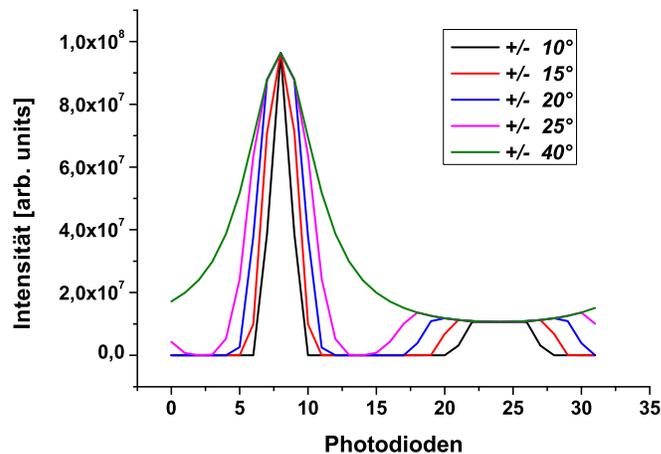


Abbildung 15: Variation der Winkelakzeptanz.

Man sieht, dass sich bei immer geringeren Winkeln ein zweites Maximum bildet. Die Photodioden bei welchen die totale Signalmaxima detektiert wurden, liegen räumlich genau gegenüber. Das zweite Intensitätsmaximum ist jedoch kleiner, da hier die Distanz zwischen dem Strahl und der Photodiode höher ist als auf der gegenüber liegenden Seite. Das heißt also, dass bei geringerer Winkelakzeptanz sich eine weitere Variable einstellt, die zur Auswertung des Systems sehr behilflich wird. Das Verhältnis der angesprochenen Photodiode an den jeweiligen Seiten und die Differenz der Maxima besitzen einen Informationsgehalt über Strahldurchmesser und Strahlposition. Es muss also für die zukünftige Entwicklung des Detektors ein Bestreben sein, die Winkelakzeptanz möglichst gering zu halten, um einen erhöhten Informationsgehalt zu erreichen.

4.4 Variation der Auflösung des simulierten Detektors

Um zu ermitteln, ob eine höhere Anzahl an Photodioden zu einer höheren Auflösung des Detektors führen, wurde bei einer Winkelakzeptanz von $\pm 20^\circ$ die Anzahl der Photodioden erhöht. Die Ergebnisse sind in Abbildung 16 aufgeführt.

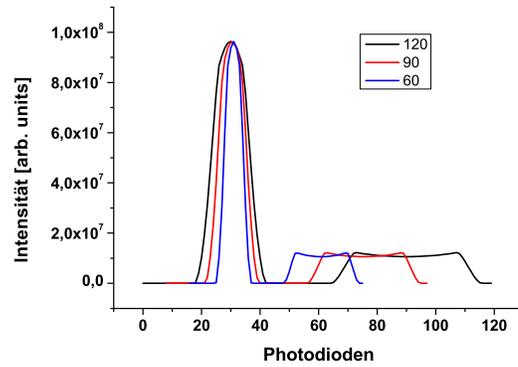


Abbildung 16: Anzahl der Photodioden, 60,90 und 120.

Man sieht, dass sich die Signalform nicht signifikant ändert, sondern sich lediglich die Anzahl der angesprochenen Photodioden erhöht. Die Anzahl der angesprochenen Photodioden geben in diesem Fall keine zusätzlichen Informationen, die in der Auswertung benutzt werden können. Es erhöht sich trotzdem die Auflösung des Detektors, wobei eine höhere Anzahl an Detektoren natürlich eine bessere statistische Auswertung der Signale heißt. Somit ist auch darauf zu achten, dass bei der Konstruktion eines optimierten Detektors möglichst viele Photodioden eingesetzt werden.

Nach Variation der einzelnen Parameter wurde nun die obige radiale Bewegung wiederholt und dabei der Detektor optimal eingestellt. Es wurde eine Winkelakzeptanz von $\pm 20^\circ$ eingestellt und 90 Photodioden zur Detektion eingesetzt. Der simulierte Strahl hatte einen Durchmesser von 7,5 mm. Die Ergebnisse für verschiedene Strahlpositionen sind in Abbildung 17 zu erkennen.

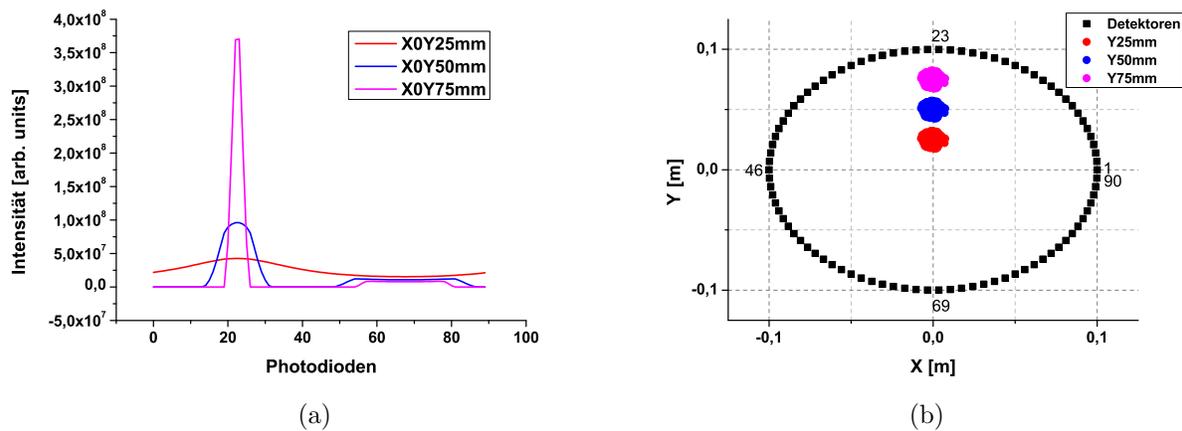


Abbildung 17: Radiale Bewegung des Strahls bei optimal eingestellten Detektoren: a) Simulierte Intensitätsverteilung mit absoluten Werten b) Simulierte Anordnungen der Detektoren mit verschiedenen Strahlpositionen.

Abschließend wurden die obigen optimalen Parameter belassen, der Strahl wurde an die Position $y = 50$ mm gesetzt und der Durchmesser nochmals variiert. Das Ergebnis ist in Abbildung 18 aufgeführt.

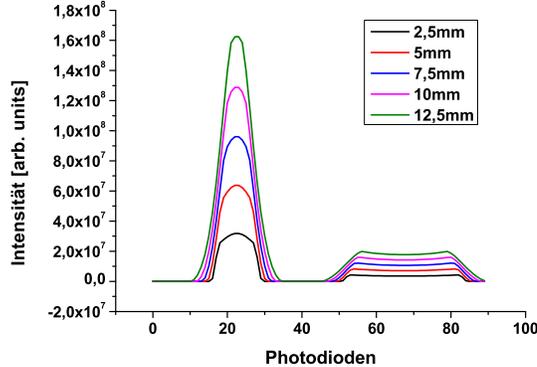


Abbildung 18: Änderung des Durchmessers bei realistisch optimal eingestelltem Detektor.

Man erkennt, wenn man die Abbildung 17 und Abbildung 18 miteinander vergleicht, dass bei der radialen Bewegung die Anzahl der angesprochenen Photodioden variiert und damit eine Variable dafür ist, um die genaue Position des Strahls zu detektieren. An der Abbildung 18 sieht man, dass die Anzahl der angesprochenen Photodioden nicht so sehr variieren wie die Intensität der einzelnen Photodioden.

5 Entwicklung des Detektors

Da hauptsächlich die Strahleigenschaften in dem magnetostatischen Speicherring untersucht werden sollen, wurde der Detektor für dieses Experiment dimensioniert. Die Toroidsegmente haben einen inneren Durchmesser von 200 mm. Um diesen Raum optimal zu nutzen, beträgt der Außendurchmesser des Detektors 198 mm. Abbildung 19 bis Abbildung 22 zeigen die genauen Maße der Halterung und eines Segmentes sowie ihre 3D-Darstellungen.

Die Photodioden sind radial nach innen gerichtet und in einzelnen Segmenten befestigt. Diese sind so konzipiert, dass die Photodioden in diesen Segmenten eingelassen sind, sodass weniger Licht von den Seiten an die Photodiode gelangt und jede Photodiode eine möglichst geringe Winkelakzeptanz besitzt.

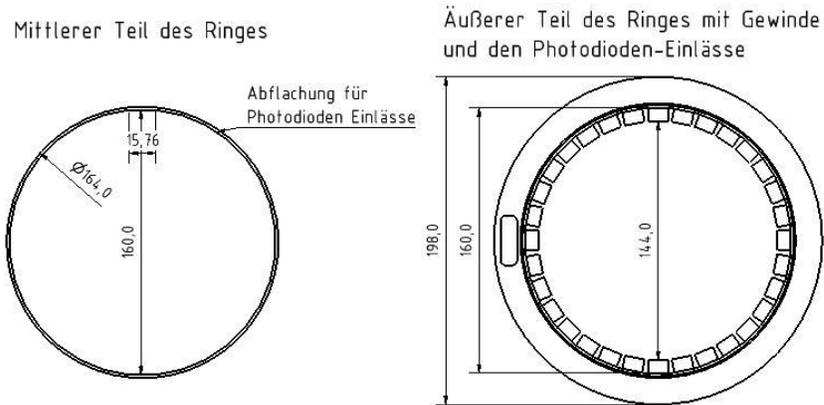


Abbildung 19: Technische Zeichnung des Detektors in Frontalansicht.

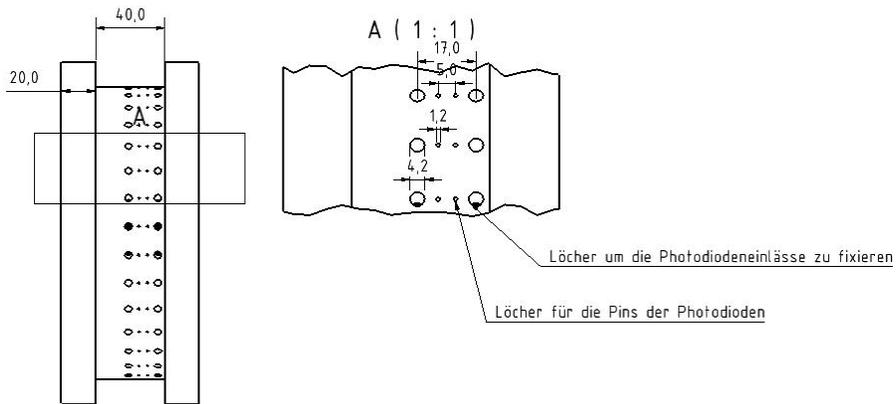


Abbildung 20: Technische Zeichnung des Detektors in Seitenansicht.

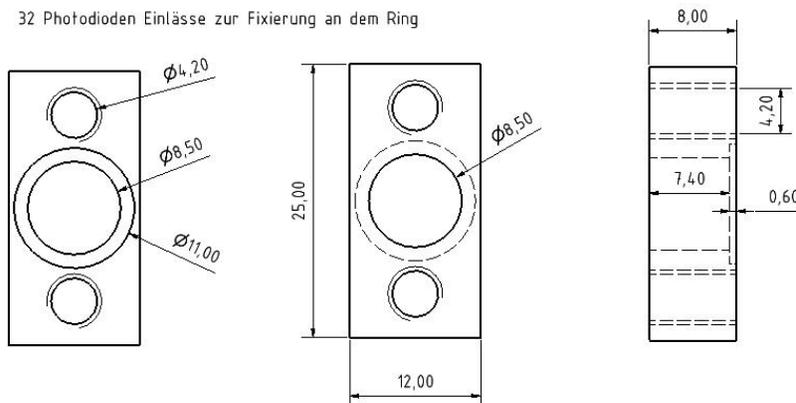


Abbildung 21: Technische Zeichnung eines Halterungssegmentes.

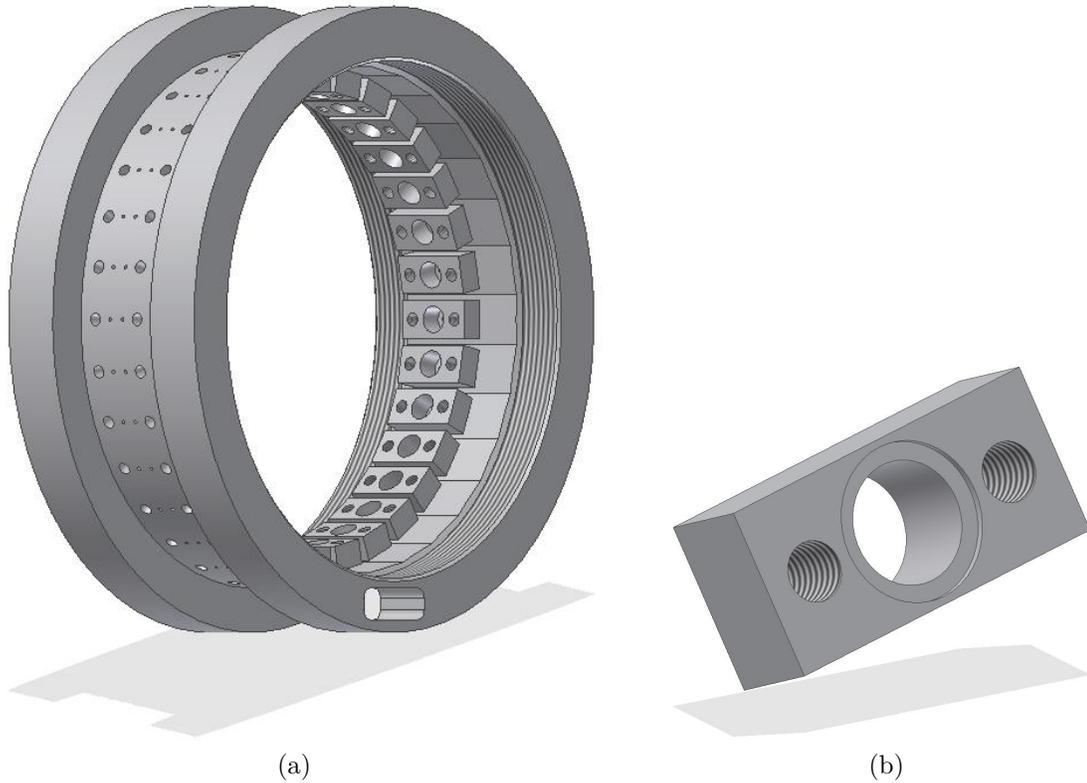
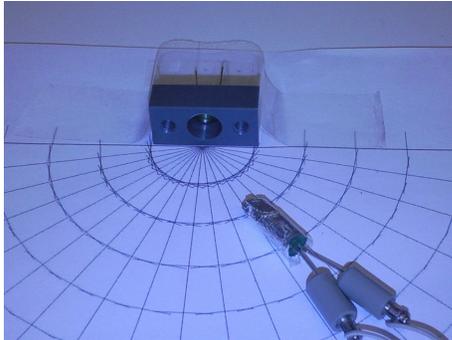


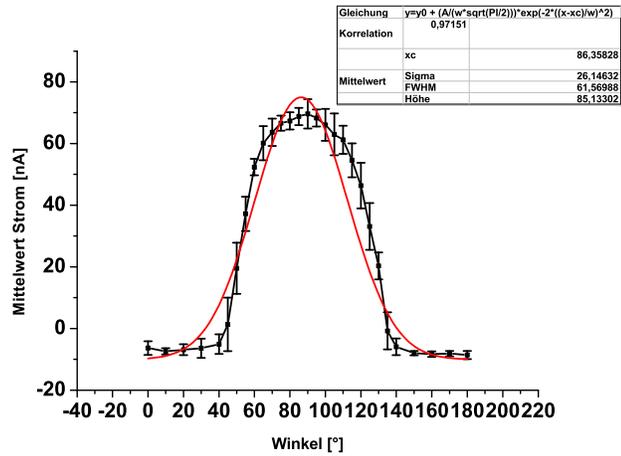
Abbildung 22: CAD Darstellung des Detektors: a) Gesamtansicht der Photodiodenhalterung b) Ansicht einer einzelnen Photodiodensegmentes

In diesem Detektor wurden 32 Photodioden eingebaut, die in der Photovoltaik-Schaltung verkabelt sind, womit direkt der Strom gemessen werden kann. Dabei sind die Anoden, also die Massen, alle zusammen verkabelt und die Kathoden parallel an eine Messerleiste in der Bauform D angelötet. Von dort aus gehen die Kabel an einen 32 Multipin Rundsteckverbinder MIL-C-26482. Dieses fungiert gleichzeitig als Vakuumdurchführung.

Eine weitere wichtige Eigenschaft, wie schon oben erwähnt, ist die Winkelakzeptanz. Um diese zu ermitteln, wurde ein Photodiodensegment herausgenommen und eine LED von 0 bis 180 Grad um diesen herumgefahren. Abbildung 23 zeigt den experimentellen Aufbau sowie das Ergebnis der Messung.



(a)



(b)

Abbildung 23: Ermitteln der Winkelakzeptanz: a) Experimenteller Aufbau b) Ergebnis der Winkelakzeptanz

Ab einem Winkel von 40° erhält man eine signifikante Steigerung des Photodiodenstromes. Nähert man den Graphen mit einem Gauss-Fit an erhält man für den FWHM-Wert: $61,5^\circ$. Somit liegt die Winkelakzeptanz bei $\pm 30,75^\circ$. Die angegebenen Fehlerbalken beziehen sich auf insgesamt sechs Messungen mit drei verschiedenen Photodioden. Im nächsten Kapitel wird auf die Simulation des Detektors eingegangen, wobei hier die untere Grenze der Winkelakzeptanz ermittelt wird, um die Öffnung der Photodioden weiter zu optimieren.

6 Kalibrierung des Detektors

6.1 Datenerfassungssystem

Das manuelle Auslesen der 32 Photodioden mit Hilfe eines Multimeters nimmt sehr viel Zeit in Anspruch. Als Ausleseelektronik wird eine sehr empfindliche Strommessanlage benötigt, die die geringen Ströme aller 32 Photodioden möglichst schnell ausliest und die Daten digital auf einen Computer überträgt.

Eine mögliche Lösung ist es die Photodiodenströme mit Hilfe des Datenerfassungssystems einer Emittanzmessanlage auszulesen. Eine, zur Zeit am Institut für Angewandte Physik aufgebaute Schlitz-Gitter Emittanzmessanlage, besitzt ein Datenerfassungssystem, welches Ströme in Größenordnungen von Nanoampere ermitteln kann. Das Datenerfassungssystem funktioniert so, dass die Ströme der Photodioden in einem Kondensator gespeichert werden und diese nach einer bestimmten Zeit ausgelesen werden. Es wurde der kleinste Kondensator mit einer Kapazität von 10 nF eingestellt. Die Zeit, in der der Kondensator aufgeladen und ausgelesen wird, wird als Integrationszeit bezeichnet. Für diesen Kondensator kann man die Größenordnungen von μs bis ms variieren.

Bevor jedoch die Messungen mit einem Ionenstrahl durchgeführt werden können, muss die Kalibration des Systems durchgeführt werden. Hierzu wird eine homogen radial nach außen hin leuchtende Lichtquelle benötigt. Ein Leuchtstab ist eine Lichtquelle, die unkompliziert zu beschaffen ist und sehr flexibel ist. Das Leuchten des Leuchtstabes beruht auf der Chemolumineszenz. Der Leuchtstab ist sehr handlich und für die ersten Messungen optimal geeignet.

Wie oben beschrieben, misst das Datenerfassungssystem der Emittanzanlage die Ströme der Photodioden, aber sie gibt nicht Ströme sondern nur Intensitäten an. Zunächst wurde eine Dunkelmessung vorgenommen und die Anlage auf Dunkelstrom bzw. Rauschen in den Leitungen kalibriert. Der Detektor wurde in eine schwarze Box gelegt, so dass während der Messung möglichst kein Licht an diesen gelangt. Es wurde die Integrationszeit variiert, um eine möglichst optimale Zeit zu finden. Die Ergebnisse sind in Abbildung 24a aufgetragen.

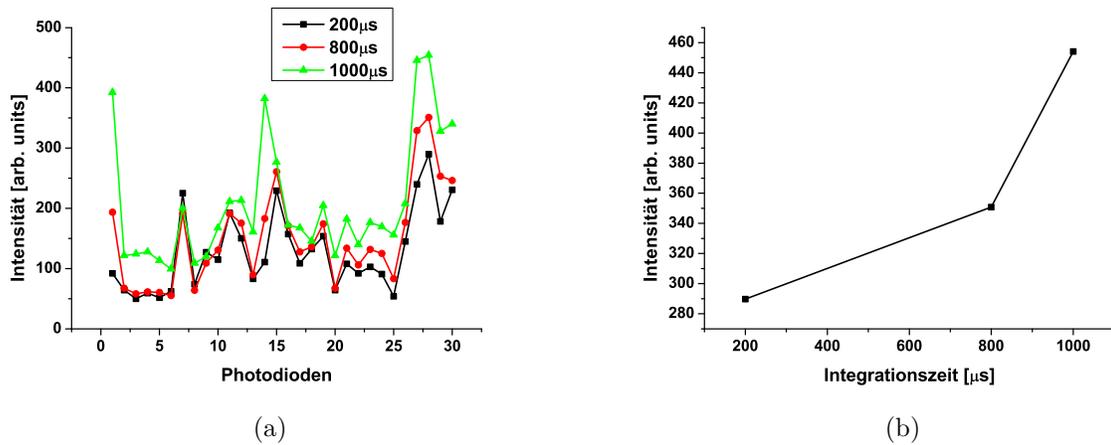


Abbildung 24: Ergebnisse der Dunkelmessung: a) Intensität bei verschiedenen Integrationszeiten. b) Abhängigkeit der aufintegrierten Fläche unter den Graphen ($200\mu\text{s}$, $800\mu\text{s}$ und $1000\mu\text{s}$) von der Integrationszeit.

Anhand der Abbildung 24a erkennt man den Zusammenhang zwischen Intensität und Integrationszeit für drei verschiedene Integrationszeiten. Dies wird bei sehr schwachen Lichtquellen bei denen länger belichtet werden kann, um die Ströme der Photodioden zu messen, benutzt.

Das Maximum der Intensität (I_{max}) in willkürlichen Einheiten bei einer Integrationszeit von $1000\mu\text{s}$ liegt bei $I_{max} = 454,1$. Im Vergleich mit weiteren Messungen ist dieser Wert sehr klein, was wiederum ein sehr geringes Dunkelrauschen des Systems bedeutet.

6.2 Kalibrierung mit Hilfe eines Leuchtstabes

Abbildung 25 zeigt den experimentellen Aufbau der Kalibrierungsmessung mit dem Leuchtstab. Die Position konnte mit Hilfe einer geeigneten Halterung genau bestimmt werden, sodass in dem Vergleich zwischen Simulation und dem Experiment genaue Vergleichsmöglichkeiten bestehen.

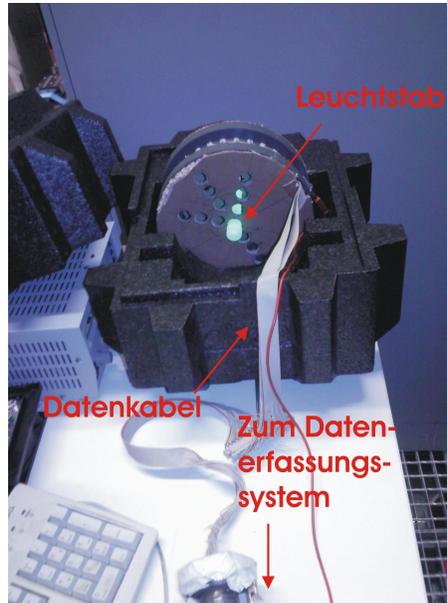


Abbildung 25: Experimenteller Aufbau mit Leuchtstab.

In der ersten Messung wurde der Leuchtstab in der Mitte gehalten. Das Ergebnis ist in Abbildung 26 aufgetragen. Bei einer idealen, homogenen Lichtquelle ist ein konstantes Signal zu erwarten, da an dieser Stelle alle Photodioden die selbe Intensität an Licht detektieren sollten.

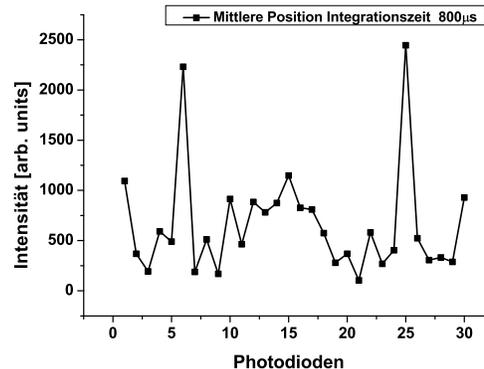


Abbildung 26: Messung bei Licht in der Mitte bei einer Integrationszeit von $800\mu\text{s}$.

Man erkennt zwei Peaks bei den Photodioden 6 und 25. Die maximale Intensität liegt bei $I_{max} = 2445,5$ bei einer Integrationszeit von 800μ . Die gemessenen Werte sind nicht konstant. Die relativ starken Variationen der Intensitäten könnten Reflexionen innerhalb des Ringes sein. Eine andere Möglichkeit wäre, dass das Datenanalysesystem ein zu großes Rauschen mitmisst. Des weiteren wurde der Leuchtstab an verschiedenen Positionen justiert.

Zunächst wurde der Leuchtstab im Abstand 37 mm von der Mitte fixiert und dieser nur azimuthal bewegt. Abbildung 27a zeigt eine schematische Skizze des Detektors und die Positionen des Leuchtstabes. Die Intensitäten wurden mit dem maximalen Wert auf 1 normiert und in Abhängigkeit der Position der Photodioden aufgetragen. Die Photodioden wurden durchnummeriert und mit Buchstaben versehen. Ferner sind die Photodioden, wie oben schon beschrieben im Winkelabstand von $11,25^\circ$ voneinander angebracht.

Die azimuthale Bewegung wurde mit dem roten Pfeil angedeutet. Diese konnte man in der durchgeführten Messung sehr deutlich erfassen. Abbildung 27b zeigt vier verschiedene Messungen, die an vier verschiedenen Positionen in einem Graph zusammengefasst sind.

Zu beachten sind in Abbildung 27b die Anzahl der angesprochenen Photodioden. An dieser Position liefern 4-6 Photodioden ein Signal. Desweiteren sieht man, dass das jeweilige Maximum sich nach der azimuthalen Bewegung verschiebt, sodass man aus der Photodiode mit der höchsten Intensität die azimuthale Position ermitteln kann.

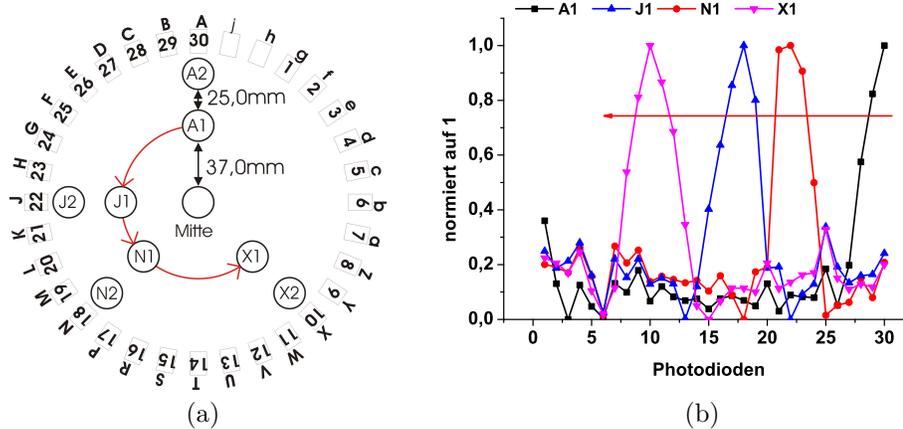


Abbildung 27: Verschiedene Positionen des Leuchtstabes mit normierten Werten im Abstand von 37 mm vom Mittelpunkt aus: a) Roter Pfeil zeigt die azimuthale Bewegung b) Man erkennt hier die Verschiebung der Maxima.

Die radiale Bewegung der Lichtquelle kann über die Anzahl der angesprochenen Photodioden erfasst werden. Dies erkennt man beim Vergleich der in Abbildung 28b dargestellten Messung bei $r = 62$ mm mit der in Abbildung 27b dargestellten Messung bei $r = 37$ mm.

In Abbildung 28b erkennt man die azimuthale Bewegung im Abstand von 62 mm vom Mittelpunkt aus.

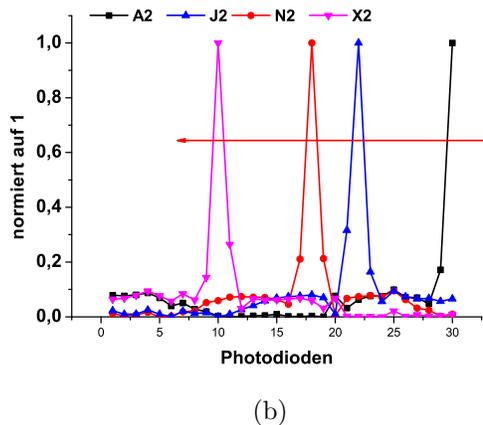
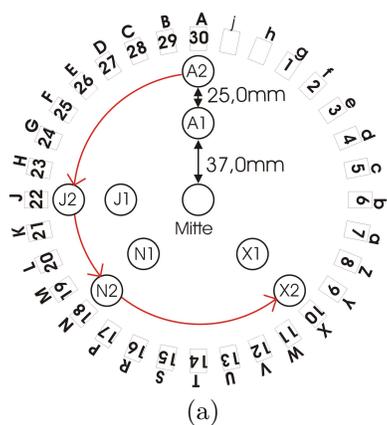
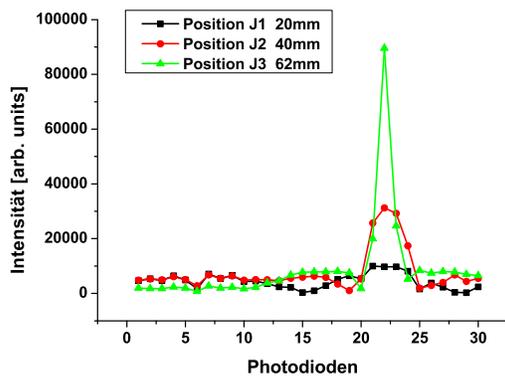
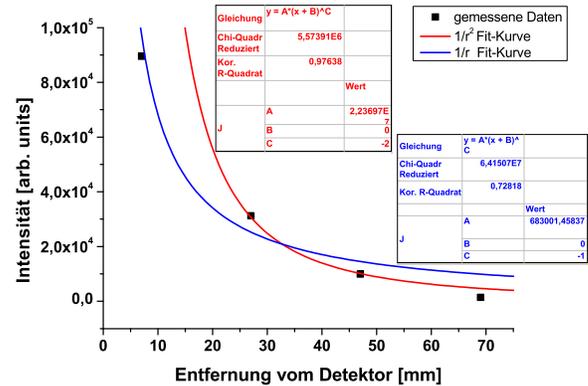


Abbildung 28: Verschiedene Positionen des Leuchtstabes mit normierten Werten im Abstand von 62 mm vom Mittelpunkt aus: a) Roter Pfeil zeigt die azimuthale Bewegung b) Man erkennt die Verschiebung der Maxima.

Für die Kalibrierung wurden mehrere radiale Positionen gemessen und diese dann miteinander verglichen. Um genauere Aussagen über die radiale Bewegung zu machen und zudem die $\frac{1}{r^2}$ Abhängigkeit der Strahlungsintensität zu untersuchen, wurden jeweils die Maxima an jeder Position genommen und in Abhängigkeit von der Entfernung von der Photodiode aus in Abbildung 29 aufgezeichnet. Man sieht an Abbildung 29b man keine $\frac{1}{r^2}$ annehmen kann, Abbildung 29b zeigt den Vergleich zwischen der $\frac{1}{r^2}$ und der $\frac{1}{r}$ Abhängigkeit. Bei einer Punktquelle, wie es in den Simulationen im Kapitel 4 angenommen wurde, hängt die Intensität von der Entfernung mit $\frac{1}{r^2}$ ab. Im Experiment weicht jedoch die Form des Leuchtstabes ab. Zunächst hat es eine nicht homogen zylindrische Form und hat eine endliche Länge, sie strahlt nicht homogen. Aufgrund dessen weicht die Abhängigkeit von der $\frac{1}{r^2}$ Abhängigkeit ab. Diese sollte zwischen dem einer Punktquelle und eines homogen unendlich langen zylindrischen Quellen liegen.



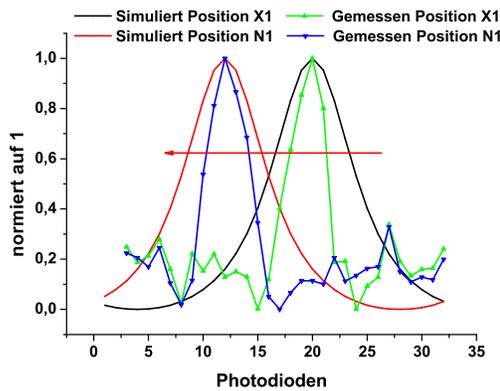
(a)



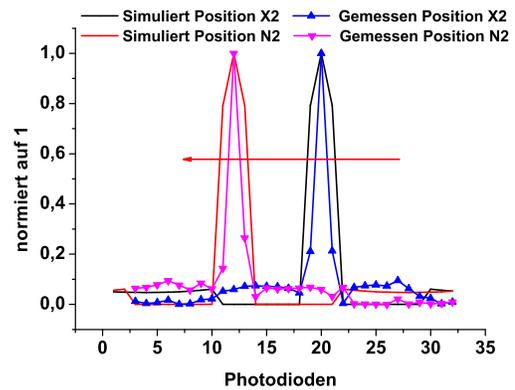
(b)

Abbildung 29: Radiale Positionsänderung mit dem Leuchtstab: a) Änderung der Intensität bei radialer Verschiebung b) Strahlungsintensität in Abhängigkeit der Entfernung von der Photodiode aus. Verglichen ist die $\frac{1}{r^2}$ (rote Kurve) mit der $\frac{1}{r}$ (blaue Kurve) Abhängigkeit. Wobei die $\frac{1}{r^2}$ Abhängigkeit eine 97 prozentige Korrelation ergibt und die $\frac{1}{r}$ Abhängigkeit eine 72 prozentige Korrelation.

Wenn man genau die im Experiment gewählten Parameter einstellt und diese in die Simulationsrechnung einsetzt, erhält man den folgenden in Abbildung 30 aufgezeigten Vergleich zwischen errechneten und experimentell ermittelten Werten.



(a)



(b)

Abbildung 30: Vergleich der Werte aus Experiment und Simulation: a) 37mm vom Mittelpunkt entfernt b) 62mm entfernt vom Mittelpunkt

Man sieht die sehr gute Übereinstimmung der gemessenen Daten mit den errechneten Werten, bei Bestimmung der Signalmaxima.

Um zu verifizieren, dass das Datenerfassungssystem korrekt arbeitet, werden einige Werte mittels eines Amperemeters gemessen und diese verglichen. Die mit der Simulation errechneten Werte wurden mit einbezogen. Der Vergleich zwischen den ermittelten

Werten durch das Datenerfassungssystem und der Messung mit dem Amperemeter ist in Abbildung 31 aufgeführt.

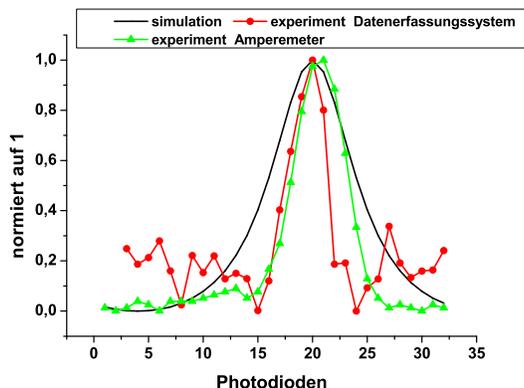


Abbildung 31: Vergleich der Werte des Datenerfassungssystems, des Amperemeters und der simulierten Werte.

Der Vergleich der Messung mit dem Amperemeter ergab eine relativ gute Übereinstimmung mit den Werten des Datenerfassungssystems.

Der nächste Schritt ist die Variation des Durchmessers im Experiment. Hierzu wurden Leuchtstäbe mit einem Durchmesser von 5 mm eingesetzt. Um nun den Durchmesser zu variieren, wurden mehrere von diesen Leuchtstäben an der gleichen Position befestigt. Das Ergebnis ist in Abbildung 32a zu sehen.

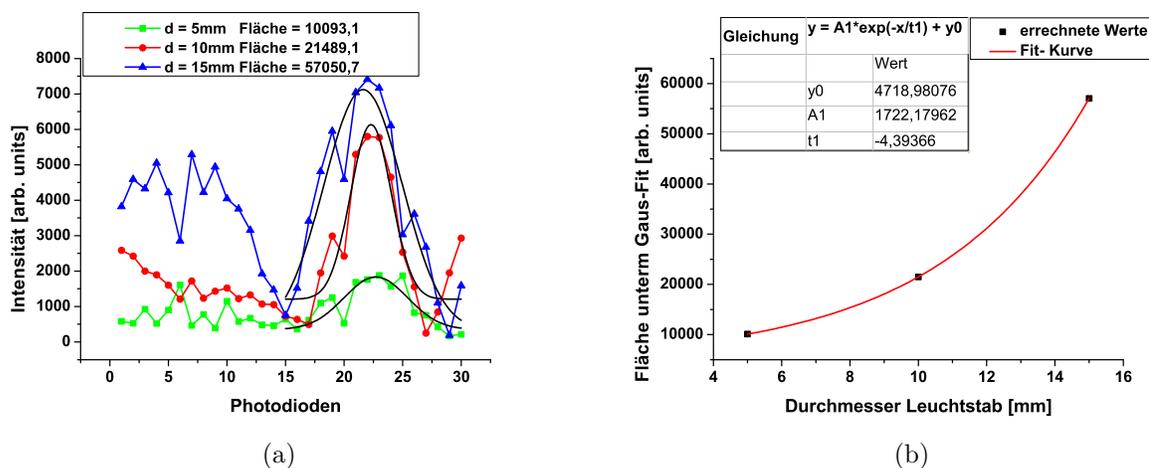


Abbildung 32: Variation des Durchmessers d des Leuchtstabes: a) Verschiedene Durchmesser durch einen Gaus-Fit angenähert (schwarze Kurve) b) Die Fläche unter dem Gaus-Fit in Abhängigkeit von dem Durchmesser.

Die Signale im Bereich der Hauptmaxima wurden durch ein Gaus-Fit angenähert

und die Peakbreite ermittelt. Die Abbildung 32b zeigt, dass das Integral unter dem Graphen eine gute Möglichkeit ist den Durchmesser des Strahls zu ermitteln.

Für weitere Kalibrierungen wurden mehrere Leuchtstäbe an verschiedenen Positionen befestigt, um einen inhomogenen Strahl vorzutäuschen. Die Ergebnisse sind in Abbildung 33 aufgeführt.

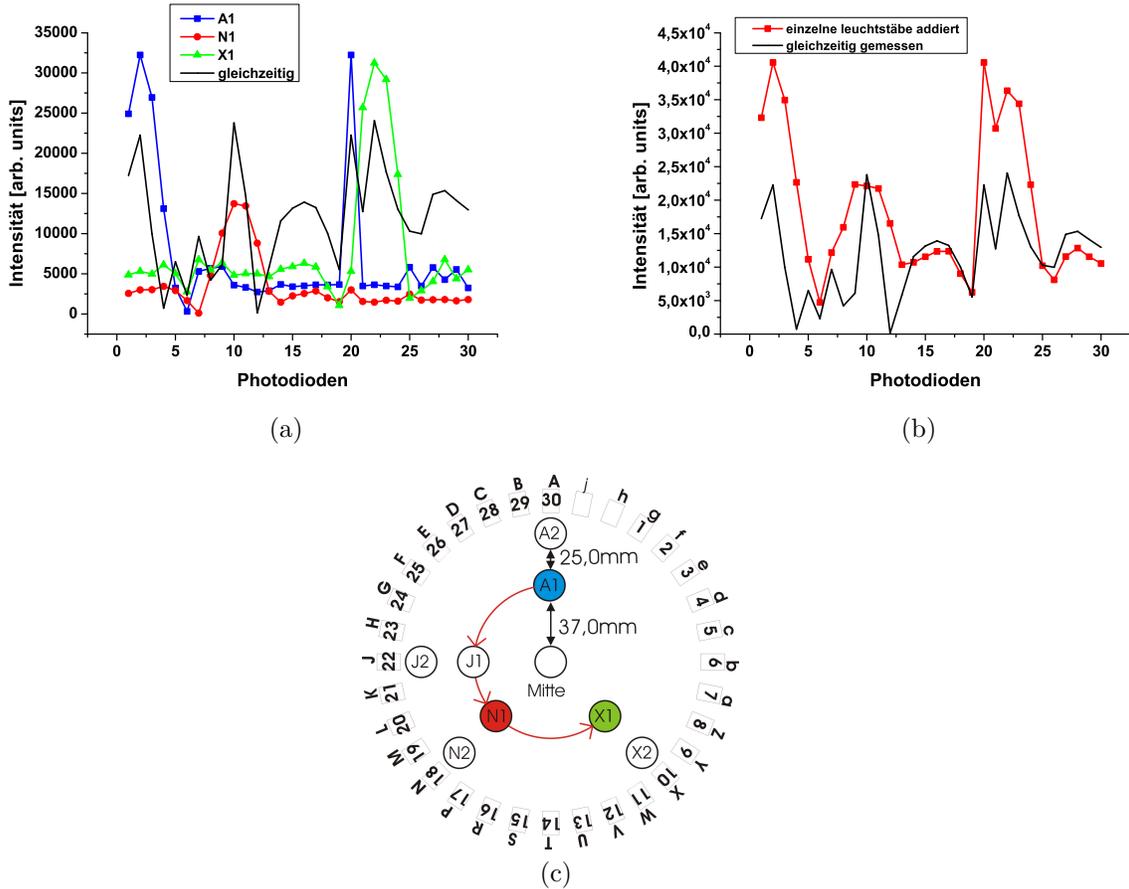


Abbildung 33: Vergleich mit mehreren Leuchtstäben an verschiedenen Positionen: a) Vergleich einzelne Messungen mit gleichzeitiger Messung b) Vergleich einzelne Messungen miteinander addiert und gleichzeitige Messung c) Jeweilige Position der Leuchtstäbe ist eingefärbt.

Zu Beginn des Versuches wurde an drei verschiedenen Positionen jeweils nur ein Leuchtstab angebracht. Anschließend wurden alle drei Leuchtstäbe an den drei Positionen befestigt und es folgte die gleichzeitige Messung. Abbildung 33a zeigt zunächst den Vergleich der einzelnen gemessenen Werte mit den gleichzeitig gemessenen Werten. Diese stimmten größtenteils überein, jedoch erkennt man eine größere Übereinstimmung, wenn man die einzeln gemessenen Werte zusammenaddiert und diese dann wieder mit den gleichzeitig gemessenen Werten vergleicht, wie in Abbildung 33b gezeigt ist. Dieses Experiment hat gezeigt, dass man auch inhomogene Strahlen bzw. mehrere Strahlen auf einmal detektieren kann.

6.3 Kalibrierung mit Hilfe der Geißler-Röhre

Es wurde nun versucht eine strahlähnliche Lichtquelle einzusetzen, wo man jedoch zumindest die Position der Lichtquelle genau bestimmen kann. Dabei wurde eine Geißler-Röhre benutzt, die aus einem Glaskolben, einer Anode und einer Kathode besteht. Der Glaskolben kann evakuiert werden. Zudem kann zwischen Anode und Kathode eine Hochspannung angelegt werden. Elektronen werden dabei beschleunigt, das Restgas wird ionisiert, schließlich kommt es zum Restgasleuchten bzw. zur Gasentladung. Dieses Restgasleuchten ist ähnlich wie das Leuchten beim Ionenstrahltransport. Der Unterschied zwischen der Röhre und dem Zielexperiment, dem magnetostatischen Speicherring, ist das Glas, durch das die Photonen hindurch müssen, um an die Photodioden zu gelangen. Mögliche Störquellen sind Reflexionen an dem Glaskolben. Abbildung 34 zeigt den Versuchsaufbau mit dem Photodiodenring und der Geißler-Röhre.

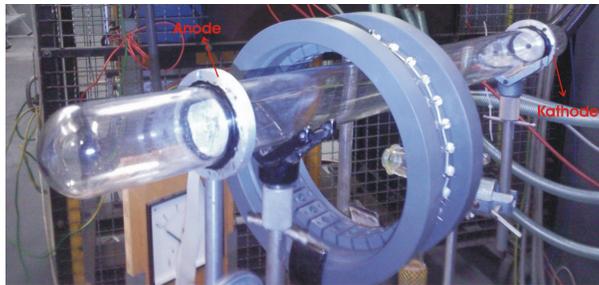


Abbildung 34: Versuchsaufbau mit der Geißler-Röhre.

In der mit Luft gefüllten Geißler-Röhre herrschte konstanter Druck von $3,1 \cdot 10^{-1}$ mbar und die Spannung wurde während den Experimenten zwischen $3kV$ und $6kV$ variiert. Externes Licht, welches das Experiment stören könnte, konnte man aus technischen Gründen in dem Fall nicht völlig ausschließen.

Kalibrieren des Systems auf den Dunkelstrom ergab hohes Rauschen. Abbildung 35 zeigt die Dunkelmessung bei verschiedenen Integrationszeiten.

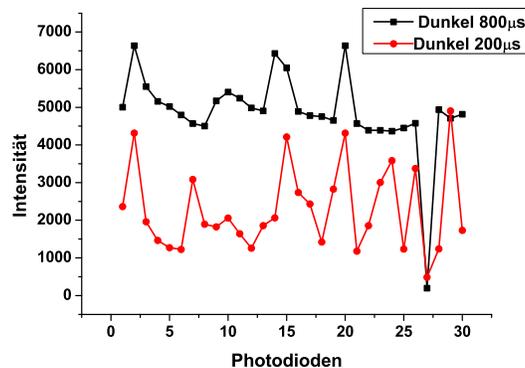


Abbildung 35: Vergleich der Integrationszeit bei Dunkelmessung.

Abbildung 35 verdeutlicht, dass das Rauschen sehr viel höher ist als bei der Dunkelmessung beim Leuchtstab. Die maximale Intensität I_{max} in willkürlichen Einheiten bei $I_{max} = 6635,1$ liegt, beim vorherigen Experiment lag der Wert bei $I_{max} = 454,1$. Der Grund dafür ist, dass der Experimentierraum nicht völlig dunkel war und das Glas der Röhre das Licht reflektierte. Um genauere Referenzwerte zu erhalten, wurde die Lichtquelle im Zentrum gehalten und verschiedene Parameter variiert; zunächst die Integrationszeit sowie die Spannung zwischen Anode und Kathode. Durch die Erhöhung der Spannung wurde das Leuchten intensiver. Die Vergleiche sind in Abbildung 36 zu sehen. Die Werte stiegen bei längerer Integrationszeit.

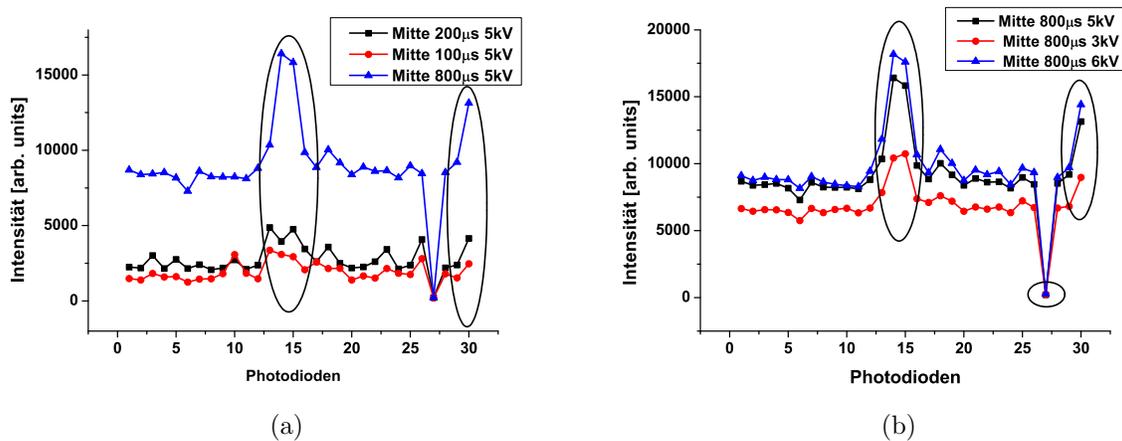


Abbildung 36: Vergleiche Messungen bei Geißler-Röhre in der Mitte: a) Variation der Integrationszeit b) Variation der Spannung zwischen Anode und Kathode.

Die Auffälligkeiten sind in Abbildung 36 eingekreist, die in den nächsten Graphen immer wieder auftreten. Grund könnten die Reflexionen von externem Licht an dem Glas sein. Photodiode 27 gab kein Signal, Grund dafür könnten fehlerhafte Ausmessungen des Datenerfassungssystems sein. Des Weiteren wurde wieder die Position der Röhre variiert und die jeweiligen Positionen sind in Abbildung 37 eingezeichnet.

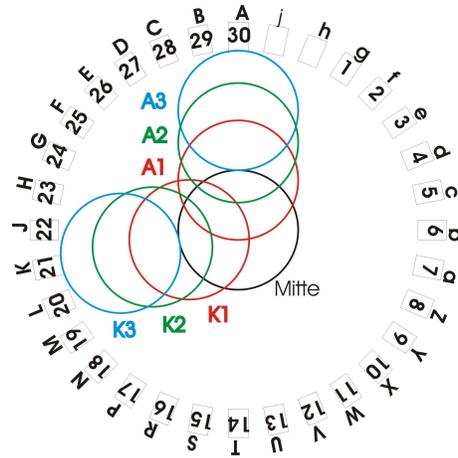


Abbildung 37: Verschiedene Positionen der Geißleröhre.

Interessant ist die radiale Bewegung. Die Abb. 38 zeigt den Vergleich zwischen der radialen Position ($A_1 \Rightarrow A_2 \Rightarrow A_3$) und ($K_1 \Rightarrow K_2 \Rightarrow K_3$), wobei die Integrationszeit $800\mu s$ und die Spannung $6kV$ betrug.

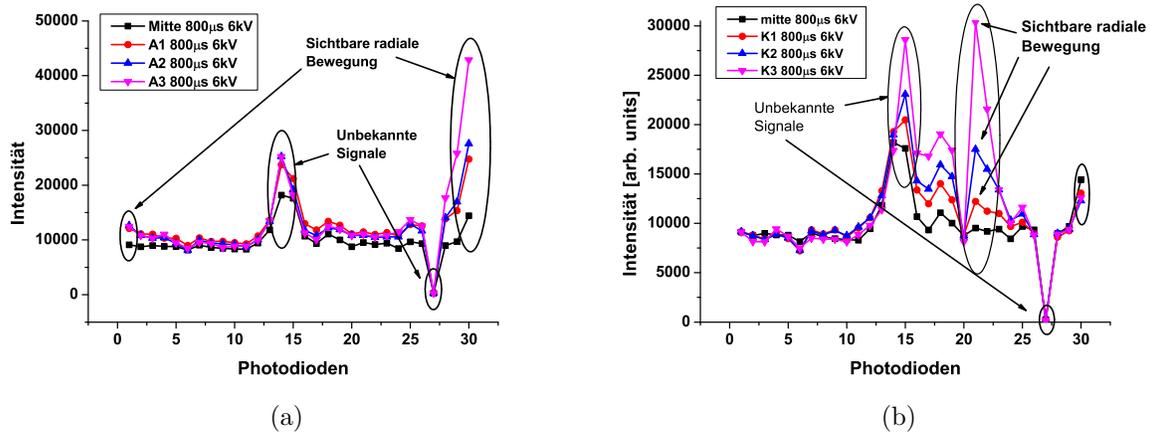


Abbildung 38: Vergleich radialer Bewegung von 19mm bis 48mm Abstand vom Mittelpunkt: a) Vergleich bei Position A b) Vergleich Position K.

Anhand dieser Graphen sieht man im Vergleich mit den Ergebnissen des Leuchtstabversuches mehr Störeinflüsse. Trotzdem kann man die Veränderungen der Ströme bei Variation der Position der Lichtquelle ermitteln. Die azimutale Bewegung in Abbildung 39 zeigt wieder die Verschiebung der Maxima.

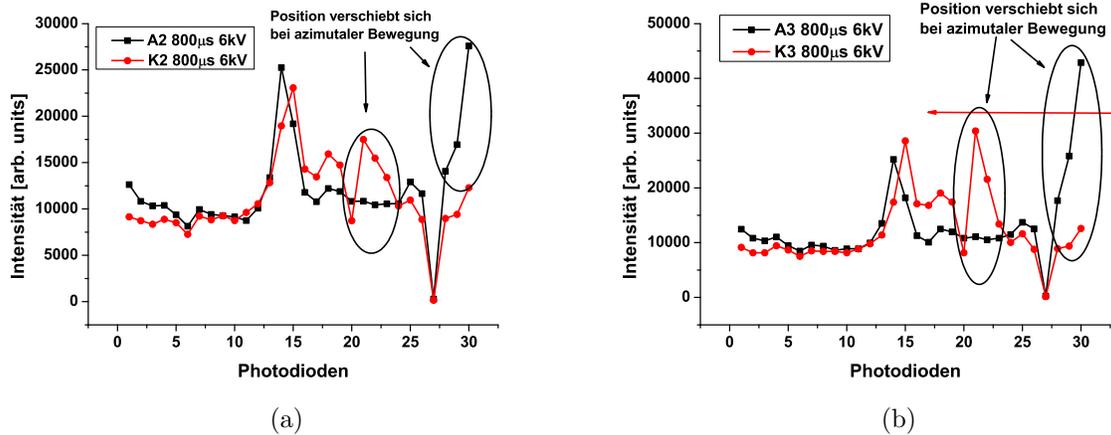


Abbildung 39: Azimutale Verschiebung: a) Pfeil zeigt azimuthale Bewegung b) Nach radialer Bewegung geben die Photodioden ein höheres Signal.

Der Vergleich der beiden Graphen in Abbildung 39 zeigt erneut, dass man die Azimut sowie die radiale Bewegung an den Graphen ablesen könnte. Um daraus wieder die Lichtquelle rekonstruieren zu können, müssen die unbekanntenen Signale geglättet werden. Diese Messungen ergeben, dass diese Lichtquelle nicht dafür geeignet ist, da man sehr schwer zwischen Rauschen und richtigem Signal unterscheiden kann.

Bei der radialen Bewegung sieht man nicht nur, dass weniger Photodioden angesprochen werden, sondern auch eine $\frac{1}{r}$ Abhängigkeit des Strahlungsintensität. In Abbildung 40 ist Aufgetragen die Intensität in Abhängigkeit von der Entfernung von der Photodiode.

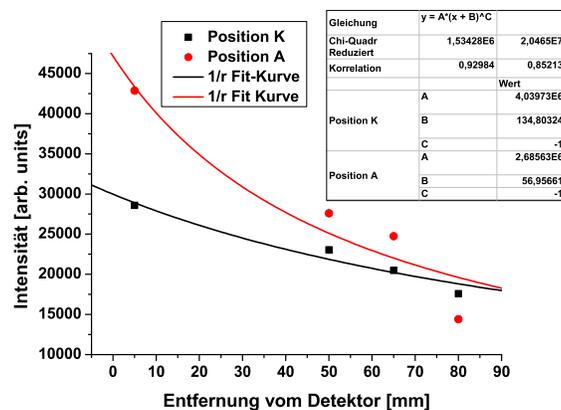


Abbildung 40: $\frac{1}{r}$ Abhängigkeit der Intensität von der Entfernung des Lichtes von der Photodiode.

7 Messung mit Ionenstrahl

Der nächste Schritt ist die Detektion eines Ionenstrahls bzw. des Restgasleuchtens im Toroidalen Versuchsaufbau. Abbildung 41 zeigt den experimentellen Aufbau. Der Detektor ist am Ende des ersten Toroiden aufgestellt. Nach dem Toroiden ist ein 30cm langer Tank angebracht an dem die Vakuumdurchführung für die Verkabelung des Detektors hindurch geht. Die Ströme wurden aus praktischen Gründen wieder mit einem Picoammeter gemessen.



Abbildung 41: Aufbau Strahlexperiment.

Zunächst wurde wie oben der Einfluss des Filamentleuchtens der Ionenquelle wie in Kap. 3.1 gemessen. Abbildung 42 zeigt das Ergebnis.

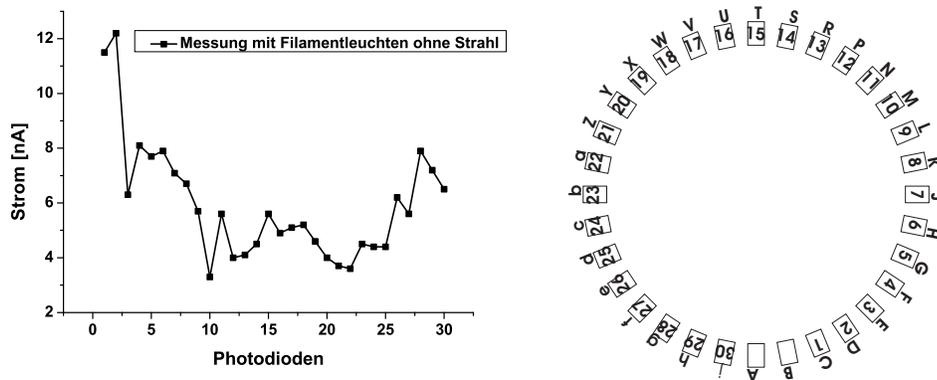


Abbildung 42: Einfluss des Filamentleuchtens.

Man sieht, dass die untere Seite des Detektors bei den Photodioden 1 bis 6 und 28 bis 30 eine höheren Strom produzieren als die obere Seite. Die unsymmetrische Ausleuchtung des Detektors liegt an der Biegung des Toroiden. Jedoch wird im weiteren erkennbar, dass die Differenz der Ströme von 9,9 nA aufgrund des Quellenleuchtens im Vergleich zu den Experimenten mit dem Ionenstrahl sehr gering ausfällt.

Im nächsten Schritt wird ein Ionenstrahl extrahiert, mit Hilfe des Solenoiden fokussiert und durch den Toroiden geführt. Am Ende geht der Strahl dann durch den Detektor. Die ersten Messungen wurden mit den in Tabelle 4 aufgeführten Parametern des Experiments durchgeführt.

Tabelle 4: Die, in der ersten Messung eingestellten Strahlparameter.

Arbeitsgas der Quelle	H_2
Restgas	H_2
Extraktionsspannung	10kV
Strahlstrom	1,074mA
B-Feld Solenoid	0,138T
B-Feld Toroid	0,6T

Abbildung 43 zeigt die Ströme der einzelnen Photodioden, wenn ein Ionenstrahl mit den in Tabelle 4 aufgeführten Parametern durch den Detektor propagiert. Wenn man dieses Ergebnis mit den bisherigen Ergebnissen vergleicht, sieht man die charakteristische Kurve, also ein Ansteigen des Stromes an den Photodioden an denen das Restgasleuchten am Intensivsten ist.

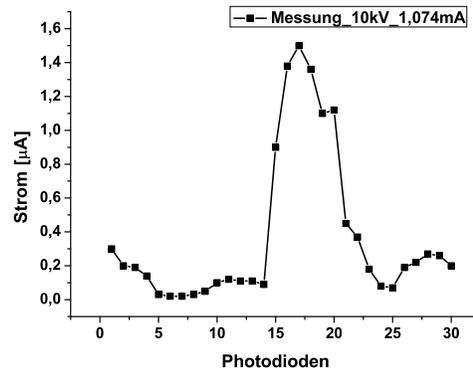


Abbildung 43: Erste Messung mit einem Ionenstrahl durch den Detektor.

Mit den Erkenntnissen aus den vorhergegangenen Simulationsrechnungen ist es nun möglich die Simulationsrechnung so an die am Experiment ermittelten Werte anzupassen, dass man die Position und das Profil des Strahl ermitteln kann. Abbildung 44 zeigt den Vergleich und Abbildung 45 zeigt die aus dem Vergleich folgende Position und Profil des Strahls.

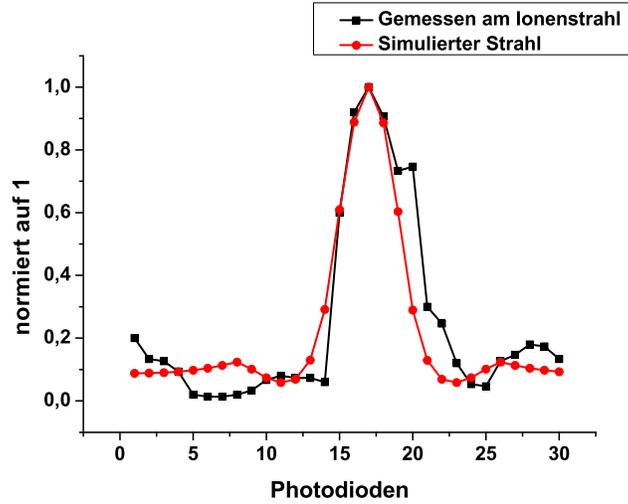
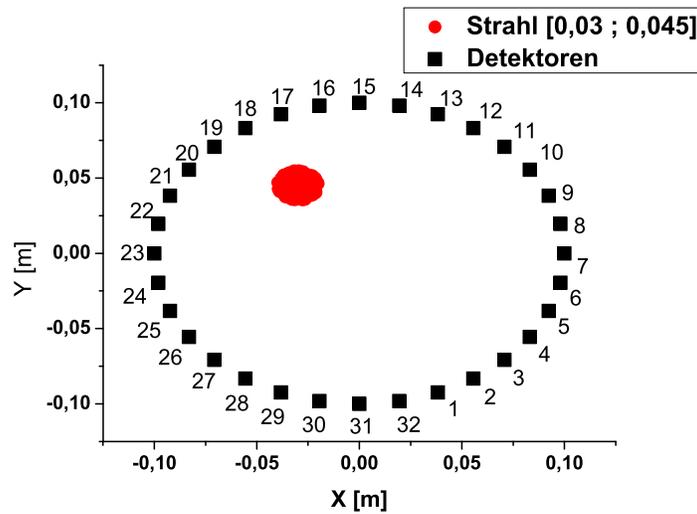


Abbildung 44: Vergleich zwischen den gemessenen Werten am Ionenstrahl mit den angepassten Werten der Simulation.



Position [m]	[0,03 ; 0,045]
Radius [m]	0,01
Anzahl Teilchen	N = 15000

Abbildung 45: Position und Profil des Simulierten Strahls

Weiter wird auf diese Experimenten im Kapitel Zusammenfassung und Ausblick eingegangen. Die Vielversprechenden Ergebnisse zeigen die Möglichkeit auf einen Ionenstrahl im Vakuum, im starken Magnetfeld, zerstörungsfrei mit Hilfe von Photodioden zu detektieren.

8 Zusammenfassung und Ausblick

Ziel dieser Arbeit ist es eine Möglichkeit zu finden eine zerstörungsfreie Strahldiagnosemethode in starken Magnetfeldern zu entwickeln. Dabei wurde das Restgasleuchten mittels Photodioden detektiert. Die Vorteile dieser sind, wie in Kapitel 1 gezeigt, die Unempfindlichkeit gegenüber Magnetfeldern, sowie die Kompaktheit, was man an der Konstruktion der Photodiodenhalterung in Kapitel 4 sieht.

Betrachtet man die Ergebnisse der Kalibrierungsexperimente, kommt man zu dem Schluss, dass es prinzipiell möglich ist den Strahl mit um diesen angeordneten Photodioden zu detektieren. Die Experimente in Kapitel 6 zeigen, dass die Bestimmung der Position des Strahls sehr gut möglich ist. Vor allem die Azimut Lage des Strahls kann man ohne jegliche Transformationen und Umrechnungen ermitteln.

Was jedoch nicht ohne weitere Transformationen und Analysen möglich ist, ist die Bestimmung des Strahldurchmessers. Dazu müssen noch weitere Überlegungen getätigt werden, wie man die Informationen der Photodioden noch weiter auswerten kann. Aus den errechneten Ergebnissen, bei der Variation des Durchmessers unter optimalen Bedingungen, erkennt man die beiden Maxima, die bei der Auswertung hinzugezogen werden können.

Im Experiment mit dem Ionenstrahl zeigte sich, dass das eine Maxima ohne weiteres zu erkennen ist. Das zweite Maxima auf der gegenüberliegenden Seite erkennt man wenn man den Anfangspunkt an dem der Graph beginnt um 5 Photodioden verschiebt das heißt, es wird in der folgenden Abbildung 46 mit der Photodiode 5 angefangen zu zählen.

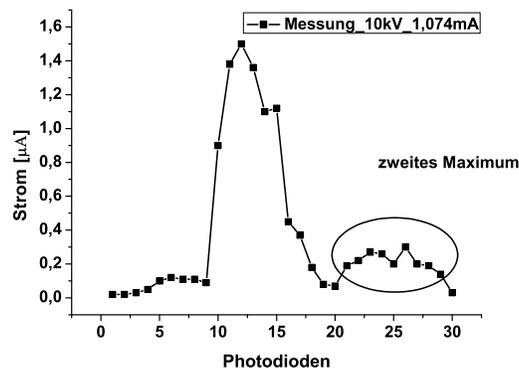


Abbildung 46: Erste Messung mit einem Ionenstrahl durch den Detektor, um 5 Photodioden verdreht.

Abbildung 44 zeigt, dass man die Position und das Profil des Strahl ohne weitere Transformationen und Berechnungen nur durch den Vergleich mit der Simulation, ermitteln kann.

Um weitere physikalische Aussagen über die Ergebnisse treffen zu können ist es sehr interessant wenn man nun das Ergebnis in Abbildung 43 mit vorherigen Experimenten vergleicht. Wie in der Einleitung erwähnt wird zur Zeit am toroidalen Strahltransport-

system ein Szintillator benutzt, um den Ionenstrahl zu detektieren. Mit dem Szintillator gibt es schon viele Messungen zur Bestimmung der Strahlposition bzw. des Strahldurchmessers. [Joshi] Die Werte der Position und des Durchmessers wurde nun in, die im Kapitel 5 vorgestellte Simulation, eingesetzt und berechnet wie die Stromverteilung der Photodioden aussehen müsste. Der Vergleich wird in Abbildung 47 gezeigt.

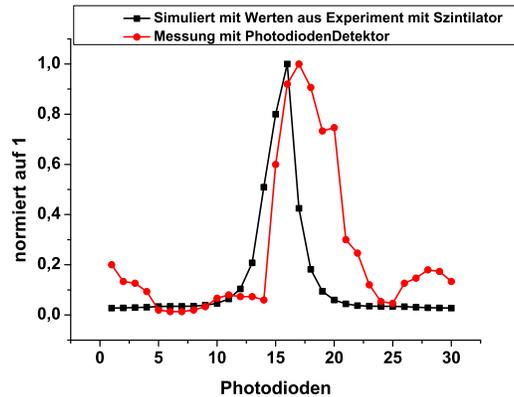


Abbildung 47: Vergleich des Experiments mit Werten aus der Simulation mit Szintillator und den Werten aus dem Photodiodendetektor.

Man sieht die relativ gute Übereinstimmung der Position bzw. der Lage des Maximums beider Messungen. Jedoch sieht man auch, dass das zweite Maximum bei der Simulation nicht auftritt und des weiteren das die Breite und somit die Anzahl an angesprochenen Photodioden geringer ist. Diese Unterschiede und weitere Auffälligkeiten, die während des Experimentes beobachtet wurden, zeigen das evtl. noch andere Effekte gemessen werden. Insbesondere könnten Elektronen die auf die Photodioden treffen die Messungen verfälschen. Um diese Fragen beantworten zu können sollten noch weitere Messungen durchgeführt werden, bei denen z.B. eine sogenannte Screening-Elektrode angebracht wird. Diese könnte auf negatives Potential gelegt und somit die Elektronen abgeschirmt werden.

Weitere Änderungen an dem Detektor sollten getätigt werden, wie die Ergebnisse der Variation der Winkelakzeptanz und die Variation der Anzahl an Photodioden in Kapitel 5 zeigen. Die Anordnung der Photodioden sowie deren Halterung sollten weiter optimiert werden. In Planung sind Photodiodenhalterungen wie in Abbildung 48 gezeigt, bei denen die Photodiodeneinlässe viel tiefer sind und das Loch nur so groß wie der lichtempfindliche Halbleiter der Photodiode ist. Damit kann man eine sehr viel geringere Winkelakzeptanz erzielen.

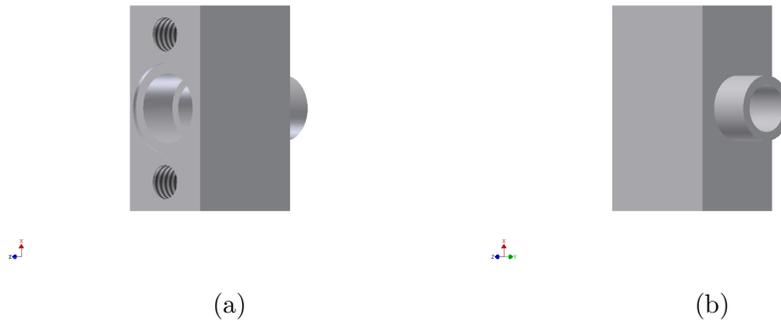


Abbildung 48: Photodiodenhalterung in Planung.

Um Elektroneneffekte besser untersuchen zu können, sind offene Leitungen, sogenannte Pins, geplant die zwischen den Photodioden liegen und die auf positives Potential gelegt werden. Mit, um den Strahl herum angeordneten, offenen Leitern können die Elektronenverteilungen innerhalb des Detektors ermittelt werden und zur Untersuchung des Ionenstrahls beitragen.

In Planung ist zudem eine rechteckige Geometrie der Photodiodenanordnung, wie in Abbildung 49 gezeigt wird.

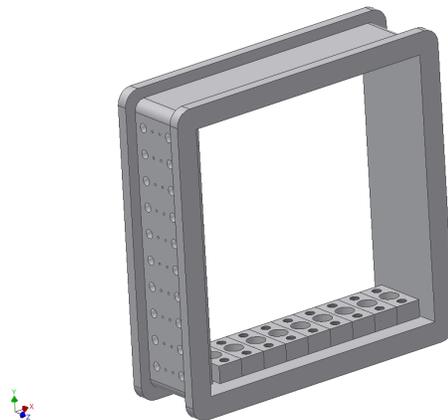


Abbildung 49: Rechteckige Geometrie der Photodiodenanordnung.

Diese rechteckige Geometrie hat den Vorteil, dass nicht alle Photodioden radial nach innen auf die selbe Stelle gerichtet sind. Dies führt dazu, dass mit ausreichend geringer Winkelakzeptanz der Photodioden keine Transformation nötig ist, um Strahlposition sowie Strahldurchmesser zu ermitteln. Zu dieser rechteckigen Anordnung wurden jedoch noch keine weiteren Messungen bzw. Berechnungen durchgeführt.

Desweiteren ist es unerlässlich ein eigenes, für den Detektor ausgelegtes Datenerfassungssystem zu installieren. Da der Detektor beweglich bleiben muss, sollte die Flexibilität bewahrt werden und vor allem das Messen der Daten innerhalb kürzester Zeit

geschehen. Dadurch wird eine zeitaufgelöste Messung möglich und weitere interessante Experimente würden sich ergeben, wenn es möglich wäre den Strahl innerhalb kürzester Zeit, im idealen Fall instantan, zu beobachten. Im Datenblatt der Photodiode sind die Anstiegs- und die Abfallzeit des Photostromes mit $1,5\mu s$ angegeben. Demgemäß sollte ein Ziel der Detektorentwicklung darin bestehen, die Datenauslese innerhalb dieser Zeit zu realisieren.

9 Literaturverzeichnis

- [Dat] *Datenblatt* BPW21 - Silicon Photodiode for the visible spectral range - Siemens Semiconductor Group
- [Joshi] *N. S. Joshi* Investigations on transport and storage of high ion beam intensities
- [Nonn] *P. Nonn* Entwicklung einer Strahldiagnose in toroidalen, magnetischen Führungsfeldern
- [Sittinger] *F. Sittinger* Untersuchungen zu optischen Profil- und Emittanzmessungen an niederenergetischen intensiven Ionenstrahlen
- [Hint] *Hinterberger* Physik der Teilchenbeschleuniger und Ionenoptik (Springer Verlag, 2.Auflage)
- [Maiberger] *D. Maiberger* Experimentelle und numerische Bestimmung der Feldverteilung von Solenoiden