
Aufbau eines Messstandes zur Charakterisierung von GEM-Detektoren

Bachelorarbeit

im Fach Physik

Fachbereich Physik
Institut für Kernphysik Frankfurt
Goethe-Universität Frankfurt am Main

vorgelegt von:

David Henry Just (4430003)
Geboren: 13.11.1990 in Weimar

Erstprüfer: Prof. Dr. Harald Appelshäuser
Zweitprüfer: Prof. Dr. Christoph Blume



Frankfurt, den 18. Januar 2014

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	4
2	Physikalische Grundlagen	8
2.1	Das Standardmodell der Teilchenphysik	8
2.2	Streuexperimente	9
2.3	Das Quark-Gluon-Plasma	10
3	Einordnung in die Forschung	12
3.1	Der LHC am CERN	12
3.2	Das ALICE-Experiment	13
4	Funktionsprinzip einer TPC	16
4.1	Allgemeines	16
4.2	Gas-Wahl	18
4.3	Die ALICE-TPC	19
4.4	Ion-Backflow	21
5	GEM-Folien	22
5.1	Allgemeines	22
5.2	Multi-GEM	24
5.3	Anwendungsmöglichkeiten	25
6	Experimentelle Vorbereitung	28
6.1	GEM-Kontrolle	28
6.2	Testkammer	29
6.3	Software	32
7	Experimentelle Durchführung	34
8	Analyse und Auswertung	36
8.1	Erste Überlegungen	36
8.2	Erste Messung Ratenabhängigkeit	38
8.2.1	Messergebnisse roh und im Verhältniss zur Primär-Ionisation	38
8.2.2	Resultierender IB	41
8.2.3	Analyse der Abweichung des Anodenstroms	43
8.3	Test auf Raumladung	44
8.4	Zweite Messung Ratenabhängigkeit	49
8.4.1	Messung in der Neon-Mischung	50
8.4.2	Messung in der Argon-Mischung	53
8.4.3	Abhängigkeiten vom Gas-Einfluss in die Kammer	58
9	Zusammenfassung und Fazit	60
10	Abkürzungsverzeichnis	62
11	Literaturverzeichnis	64
12	Abbildungsnachweis	66
13	Danksagung	70

1 Einleitung

Die folgende Bachelorarbeit befasst sich mit einem Teilaspekt der Neuentwicklung des „A Large Ion Collider Experiment (ALICE)“-Experiments, genauer gesagt mit dem Umbau der Time Projection Chamber (TPC).

Um bei ähnlicher Auflösung eine schnellere Auslese der Daten der ALICE-TPC zu erhalten, soll die Detektion an den Endplatten anstatt wie bisher Vieldrahtproportionalkammern + Schaltgitter nach dem Upgrade 2018 mit sogenannten Gas Electron Multipliers (GEM) vonstatten gehen. Diese erzeugen weniger Ionen in der Gas-Verstärkung wodurch daraufhin geringerer Verzerrungen im Drift-Feld der TPC entsteht. Dadurch muss die TPC nicht mehr getriggert betrieben werden, sondern kann durchgehend detektieren.

Ich habe mich im Rahmen meiner Arbeit insbesondere mit der Inbetriebnahme einer Testkammer für GEM-Folien sowie Messungen an dieser Kammer beschäftigt.

Im Verlauf der Zeit spezialisierte ich mich auf Messungen der entstehenden Ströme und der daraus resultierenden Größen in Abhängigkeit von der Strahl-Rate der eingesetzten Gamma-Quelle. Die Rate der Quelle konnte durch die Variation der Anzahl von Absorber-Schichten linear verändert werden konnte.

Von der ermittelten Abhängigkeit konnte anschließend darauf geschlossen werden, ob bei der verwendeten Gas-Mischung in der Kammer Raumladungs-Effekte vorhanden waren oder nicht.

Dies hat einen Einfluss auf nachfolgende Messungen an der GEM-Kammer.

Abbildungsverzeichnis

2.1	Teilchen des Standardmodells. [Wik13]	8
2.2	Teilchen-Kollision mit “spectators”(grau) und einem QGP mit freien Farbladungen. [Wien13]	9
2.3	Das Phasendiagramm der Materie. Angetragen sind Temperatur [MeV] gegen Netto-Baryonen-Dichte. Zusätzlich eingetragen sind die Beschleuniger-Anlagen RHIC, LHC und FAIR SIS 300. [GSI13]	10
3.1	Übersicht über sämtliche Beschleuniger am Conseil Européen pour la Recherche Nucléaire (CERN) inklusive Name, Länge und beschleunigter Teilchen-Sorte. [CERN131]	12
3.2	Schematischer Überblick über den ALICE-Detektor. [CERN132]	13
4.1	Schema einer TPC als Tank im End-Kappen, MWPC, Kathoden-Ebene, Teilchen-Kollision und resultierenden Elektronen im Driftvolumen. [CERN133]	16
4.2	Tabelle verschiedener TPC-Gasmischungen incl. Drift-Geschwindigkeiten und Diffusion. [Ernst1]	18
4.3	Aufbau ALICE-TPC. [Els13]	19
4.4	Das schematische Prinzip einer MWPC: Erzeugung von Elektronen und Ionen aus Sekundär-Elektronen an einem positiv geladenen Draht. (a-c) [Peters121]	19
5.1	Rasterelektronenmikroskop-Aufnahme einer GEM-Folie mit konisch zulaufenden Löchern. [Desy131]	22
5.2	Feldverlauf in den Löchern der GEM-Folien mit bildlich dargestelltem Avalanche-Effekt. [Desy132]	23
5.3	GEM-Folien als Photo-Detektor mit entsprechend beschichteter GEM1 und anschließender Verstärkung und Auslese des Elektrons.[CERN134]	25
5.4	Kammer zur Beam-Analyse. [Pin08]	26
5.5	Eingefärbte GEM-Radiographie einer Fledermaus mit 8 keV Röntgenstrahlung. [CERN135]	26
6.1	Mikroskop für GEM-Test. [Eig1]	28
6.2	Spannungs-Test. [Eig2]	28
6.3	CAD-Bild der Testkammer ohne Seitenwand. Gezeigt werden Deckel und Boden mit den zugehörigen HV-Anschlüssen. Im Hintergrund erkennt man links die Eisen-Quelle. Ebenso sind die Steifen des Feldkäfigs und die GEM-Folien, sowie die Anoden-Platine zu sehen. [Schell13]	29
6.4	Die segmentierte Anoden-Platine mit Pins zur variablen Verschaltung. [Eig3]	30
6.5	Sender und Empfänger des Kathoden-Signals. [Eig4]	31
6.6	Hauptfenster des Graphical User Interface (GUI). [Eig5]	32
6.7	Plots im GUI.[Eig6]	33
8.1	Ströme [nA] auf der Anoden-Platine mittels Einstrahlung der Fe-Quelle von links in Ar/CO ₂ . [Eig7]	36
8.2	Absorptions-Koeffizient als Funktion der Energie der γ . [Eig8]	37
8.3	Log-Plot der Primär-Ionisation. [Eig9]	37
8.4	Log-Plot der Kathoden-Ströme. [Eig10]	38

8.5	Log-Plot der Anoden-Ströme. [Eig11]	38
8.6	Kathode/Primär Raten-Abhängig. [Eig12]	39
8.7	Anode/Primär = Gas-Verstärkung Raten-Abhängig. [Eig13]	39
8.8	IB für Felder $[\frac{V}{cm}]$: 5500/200/4500. [Eig14]	41
8.9	IB für Felder $[\frac{V}{cm}]$: 3000/200/4500. [Eig15]	41
8.10	Abweichung im Anoden-Strom. [Eig16]	43
8.11	links: Ion Back-flow (IB) gegen I_{Pad} ; rechts: IB gegen $\rho_{ion} \cdot d$. [Taku1]	44
8.12	Summierte Primär-Ströme der Pad-Reihen gegen Position in der Kammer vor Umbau der Quelle. [Eig17]	45
8.13	Feld-Simulation für den Feldkäfig. [Ernst2]	46
8.14	Funktionen für Fit-Parameter der Exponentialfunktion. Reihe 2-5: rot, Reihe 1: blau, Gewünschtes Ergebnis Reihe 1: Grün. [Eig18]	47
8.15	Summierte Primär-Ströme der Pad-Reihen gegen Position in der Kammer nach Umbau der Quelle. [Eig19]	48
8.16	Logarithmische Darstellung der Primär-Ströme von Argon und Neon. [Eig20]	49
8.17	Logarithmische Darstellung der Anoden- und Kathoden-Strom abhängig von der Absorber-Dicke in Neon. [Eig21+22]	50
8.18	Darstellung der Verhältnisse Anoden-/Primär- und Kathoden-/Primär-Strom abhängig von der Absorber-Dicke in Neon. [Eig23+24]	51
8.19	IB der Neon-Mischung bei $E_{Trans_2} = 2000$ V/cm. [Eig25]	52
8.20	Logarithmische Darstellung der Anoden- und Kathoden-Strömen abhängig von der Absorber-Dicke in Argon. [Eig26+27]	53
8.21	Logarithmische Darstellung von Anoden- und Kathoden-Strömen ohne ersten Messpunkt bei höchster Rate. [Eig28+29]	54
8.22	Darstellung des Anodenstroms gegen die Peak-Position. Die Anzahl der Folien nimmt von oben nach unten zu. [Eig30]	55
8.23	Darstellung der IB für vier verschiedene Einstellungen des E_{Trans_2} . [Eig31-34]	56
8.24	IB für vier verschiedene E_{Trans_2} bei Peak-Position 359 im Vergleich. [Eig35]	56
8.25	Anoden-/Primär-Strom = Gas-Verstärkung im Argon-Gemisch. [Eig36]	57
8.26	Relative Änderung der relevanten Messgrößen in Abhängigkeit vom Gas-Fluss. [Eig37]	58

2 Physikalische Grundlagen

2.1 Das Standardmodell der Teilchenphysik

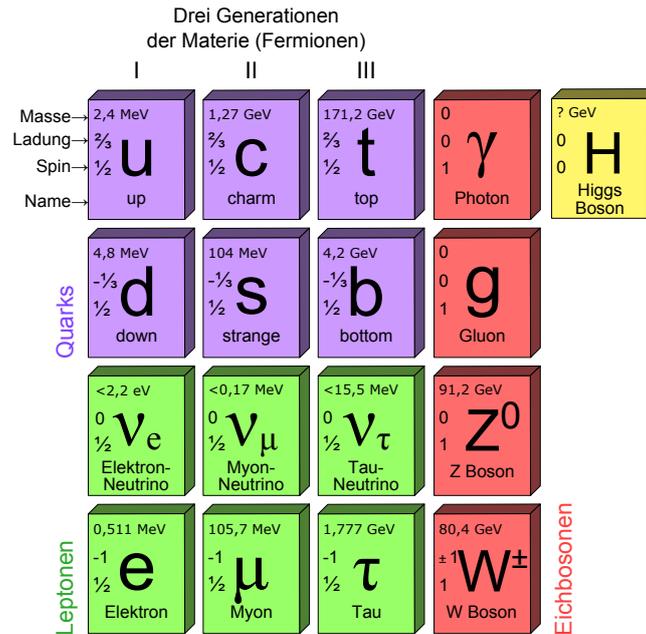


Abb. 2.1: Teilchen des Standardmodells. [Wik13]

Das Standardmodell (SM) der Teilchenphysik ist eine zusammenfassende Theorie über alle bisher bekannten Elementar- und Wechselwirkungs-Teilchen, der theoretischen sowie experimentellen Kernphysik.

Zu den Elementarteilchen gehören die sechs *Quarks* (violett in Abb. 2.1), aus denen sich zum Beispiel Hadronen wie das Proton (**uud**) und das Neutron (**udd**) bilden lassen. Diese beiden Hadronen bilden zusammen mit dem Elektron sämtliche aus dem Periodensystem der Elemente bekannten Stoffe.

Das Elektron ist das einzige *Lepton*, welches natürlich auf der Erde vorkommt. Übergeordnet gehören Quarks und Leptonen zu den *Fermionen*, welche Teilchen mit einem halbzahligen Spin ($\frac{1}{2}\hbar \cdot n$ mit $n \in \mathbb{N}$) sind. Die Fermionen des SM werden in drei Generationen unterteilt, welche der Abb. 2.1 entnommen werden können. Außerdem besitzen waagrecht nebeneinander angeordnete Fermionen immer gleiche Ladung.

2.2 Streuexperimente

Allgemein beschrieben sind Streuexperimente Vorgänge, bei denen ein Teilchen-Strahl auf eine Probe geschossen wird um neue Erkenntnisse über die Probe oder die Teilchen des Strahls selbst zu erlangen. Handelt es sich bei der Probe um ein ruhendes Material, spricht man von einem *“Fixed-Target-Experiment”*.

Das wohl bekannteste Experiment dieser Art ist der Rutherford-Versuch, bei dem ein α -Strahler auf eine Goldfolie gerichtet wurde um die Struktur von Atomen zu untersuchen.

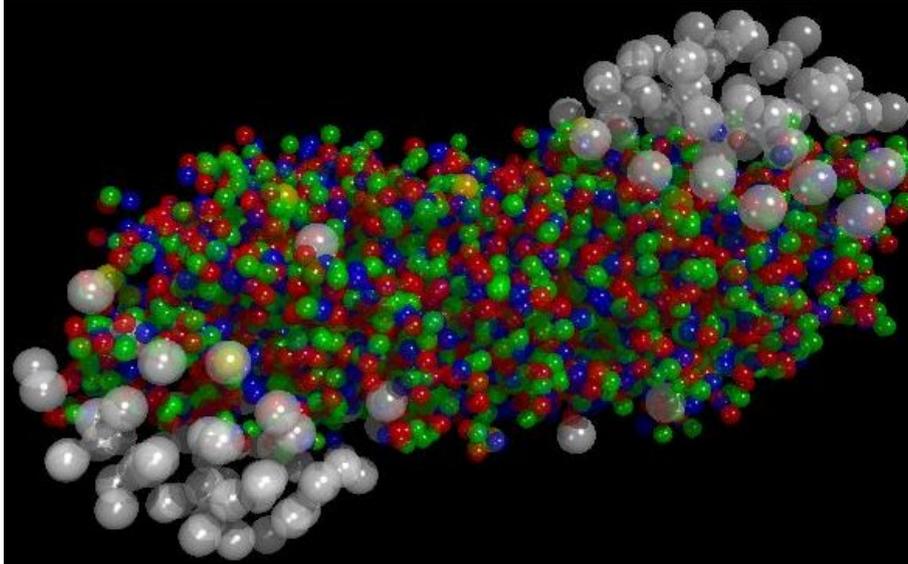


Abb. 2.2: Teilchen-Kollision mit “spectators”(grau) und einem QGP mit freien Farbladungen. [Wien13]

Die andere Art der Streuexperimente stellen die *“Collider-Experimente”* dar, bei denen die Probe aus einem weiteren Teilchenstrahl besteht.

Der entscheidende Vorteil gegenüber Fixed-Target-Experimenten ist, dass in Kollisionen identischer Strahl-Teilchen der gemeinsame Schwerpunkt fest im Mittelpunkt zwischen beiden Teilchen liegt. Somit ist die Energie des Schwerpunktes nach der Kollision genau der Summe der Einzelenergien der ursprünglichen Strahl-Teilchen. Abb. 2.2 zeigt die Darstellung eines möglichen Zustandes unmittelbar nach einer Kollision zweier Teilchen. Die am Stoß unbeteiligten Kernbausteine (grau) fliegen in ihrer ursprünglichen Flugrichtung weiter, während im zentralen Stoßbereich für kurze Zeit ein Quark-Gluon-Plasma (QGP) aus Quarks (rot, grün, blau) entsteht.

Bei solch hohen Stoßenergien bilden sich nach einer Kollision durch String breaking neue Teilchen in Schauern aus.

Durch Detektion und anschließende Aufbereitung der gewonnenen Daten, kann man diese schlussendlich analysieren. So kann man entstehende Sekundär-Teilchen ermitteln und die Kollision bis an den Ursprung zurück simulieren.

Ziel von Collider-Experimenten ist ein höheres Verständnis der Unterstruktur der Strahl-Teilchen zu bekommen oder Zustände von hoher Temperatur und Dichte zu erzeugen, wie sie zu Beginn des Universums geherrscht haben.

2.3 Das Quark-Gluon-Plasma

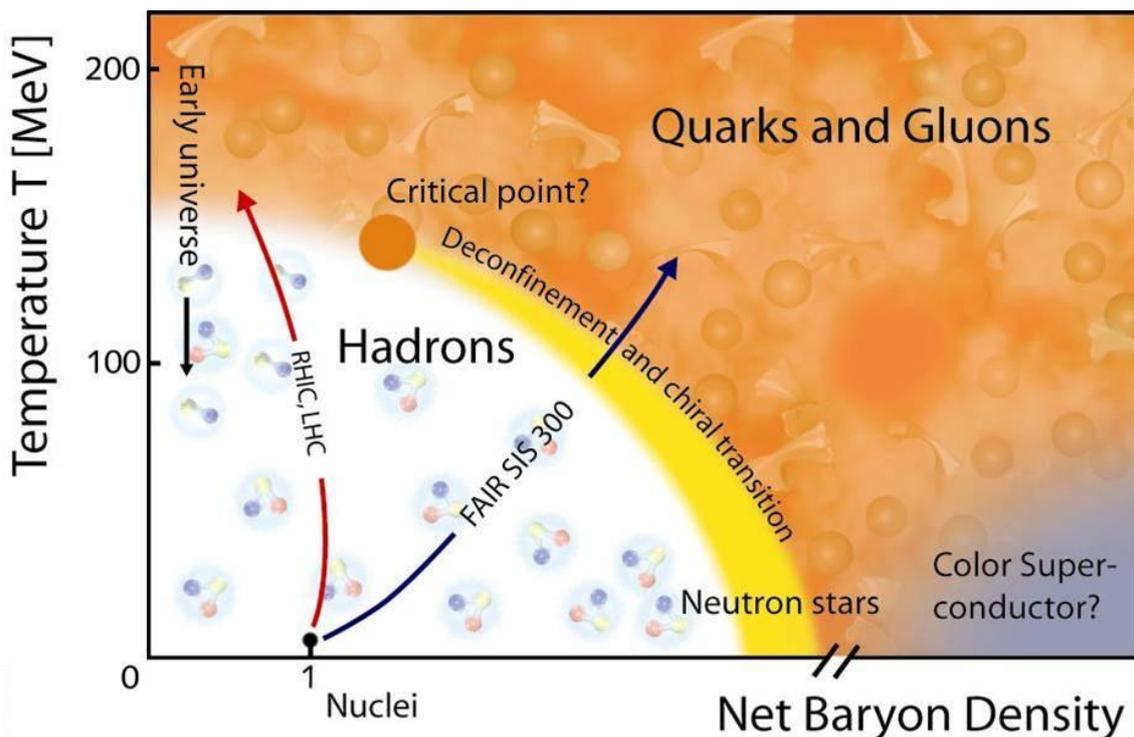


Abb. 2.3: Das Phasendiagramm der Materie. Angetragen sind Temperatur [MeV] gegen Netto-Baryonen-Dichte. Zusätzlich eingetragen sind die Beschleuniger-Anlagen RHIC, LHC und FAIR SIS 300. [GSI13]

In Abb. 2.3 sieht man das Phasendiagramm der Kernmaterie: Baryon-Dichte gegen Temperatur. Im Bereich geringer Temperatur und einer Dichte von 1 befindet sich die herkömmliche hadronische Materie.

Erhöht man von dort aus einen oder beide Parameter, so erzeugt man ein QGP. Es entsteht, wenn die Hadronen durch die äußeren Umstände so stark aufeinander gepresst werden, dass sie verschmelzen und eine zusammenhängende "Suppe" aus Quarks und Gluonen bilden, wie es in Abb. 2.2 grafisch dargestellt wird.

Während am LHC in ALICE vor allem mit hohen Energien und Temperaturen ein QGP erzeugen soll, wird das Compressed Baryonic Matter (CBM)-Experiment an der Facility for Antiproton and Ion Research (FAIR) als Fixed-Target-Experiment einen anderen Weg über die Erhöhung der Dichte nehmen.

Durch den Beschuss des festen Targets können in Vorwärts-Richtung des Strahls auch schwere Baryonen von kurzer Lebensdauer nachgewiesen werden.

(Baryonen-reich)

Im Collider-Experiment sind die erreichten Luminositäten um einiges geringer, da die Teilchen nur begrenzt eng in einen Strahl gepackt werden können.

(Baryonen-arm)

Unabhängig von der experimentellen Umsetzung, soll in beiden Experimenten ein QGP erzeugt werden. In diesem Zustand kommen sich die Hadronen so nahe, dass sie ununterscheidbar werden und einen großen See aus Quarks und Gluonen bilden. Dieser Zustand ist besonders interessant, da man Quarks statt in farb-neutralen gebundenen Zuständen nun quasi-frei untersuchen kann. Der Theorie nach wird dieser Übergang im RHIC und LHC als “cross-over “ vonstatten gehen, welcher einen verwaschenem Übergang zwischen Hadronen und QGP bedeutet.

Bei höherer Dichte erreicht man im Phasendiagramm jedoch einen kritischen Punkt, unterhalb dem der Übergang ein feste Grenze in Form eines Phasenübergangs bekommen wird. Dieser Bereich soll mit dem CBM-Experiment genauer untersucht werden.

3 Einordnung in die Forschung

3.1 Der LHC am CERN

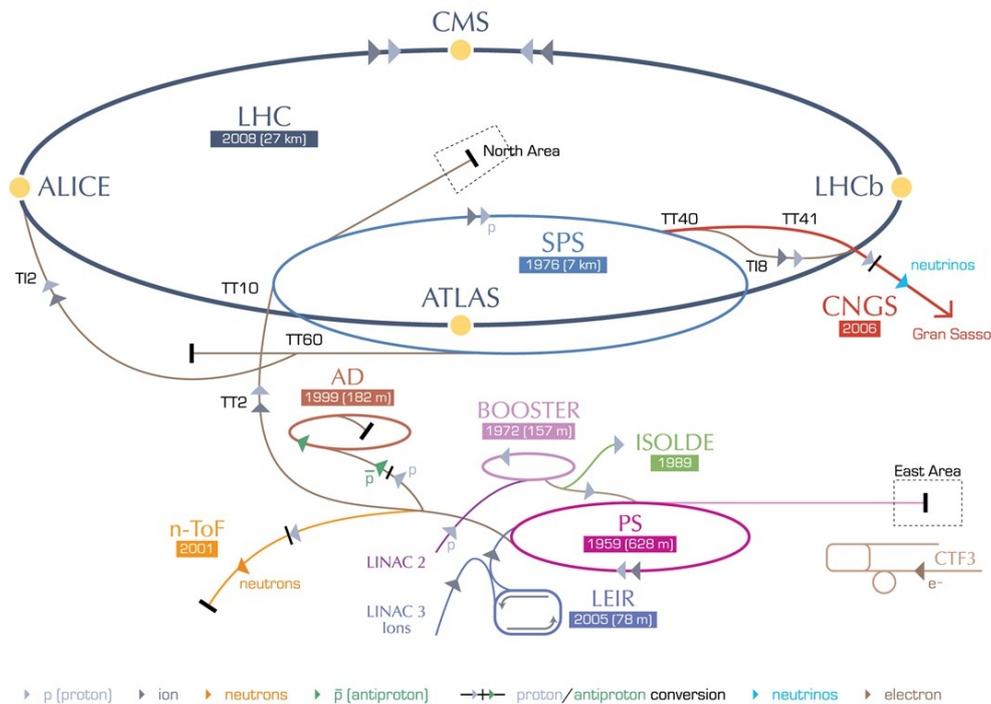


Abb. 3.1: Übersicht über sämtliche Beschleuniger am CERN inklusive Name, Länge und beschleunigter Teilchen-Sorte. [CERN131]

Der Large Hadron Collider (LHC) ist der größte Beschleuniger am CERN in Genf und der Nachfolger des Large Electron-Positron Collider (LEP).

Nach diversen Vorbeschleunigern aus Linear- und Ringbeschleunigern werden zwei entgegengesetzte Teilchen-Strahlen in den großen Ringbeschleuniger LHC induziert. Bei den Strahlen handelt es sich entweder um zwei Protonen-Strahlen "pp" oder zwei Blei-Strahlen "lead-lead" [aus dem englischen lead (chem.) = Blei]. Haben die Teilchen die für die Experimente benötigten Geschwindigkeiten erreicht, können sie an bestimmten Stellen gezielt zur Kollision gebracht werden.

An diesen Punkten befinden sich, wie in Abb. 3.1 gezeigt, die vier Experimente **ATLAS**, **CMS**, **LHCb** und **ALICE**.

Im Folgenden werde ich mich vor allem auf das **ALICE**-Projekt beziehen, da meine Bachelor-Arbeit direkt an dieses Experiment geknüpft ist.

3.2 Das ALICE-Experiment

Ziel des ALICE-Experiments ist die Untersuchung des QGP. Hierzu benutzt man Blei als Strahl-Teilchen. Die gewünschte End-Energie pro Atom beträgt bei Kollision 5.5 TeV. Die Auslese der erzeugten Signale soll dabei maximal präzise und möglichst schnell hintereinander, zum Beispiel mit mehr als 300 Hz für Pb-Pb-Kollisionen, erfolgen.

Bis auf den Absorber und die Detektion der Myonen ist das Großexperiment symmetrisch nach dem „Zwiebelschalen-Prinzip“ aufgebaut, wie in Abb. 3.2 zu erkennen ist. Das bedeutet, dass alle Detektoren rund um den zentralen Kollisionspunkt entwickelt und angebracht werden. Die äußerste Schicht bildet dabei der große Magnet (rot), welcher aus dem früheren L3-Experiment übernommen wurde.

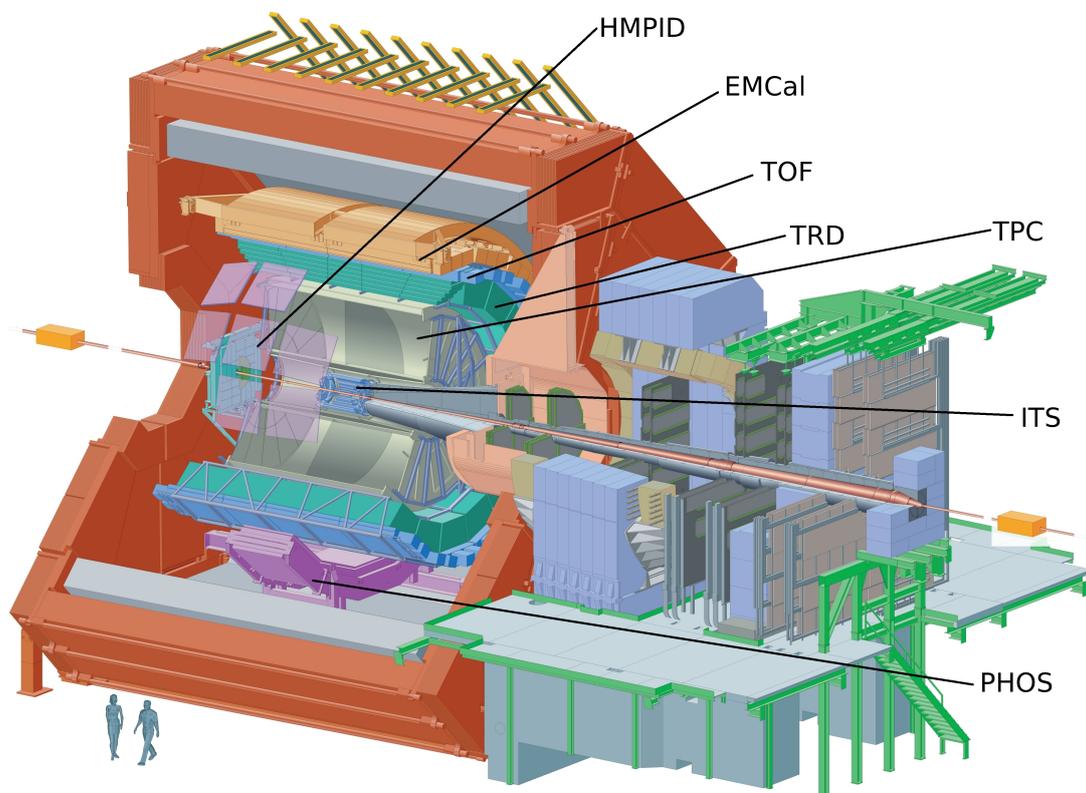


Abb. 3.2: Schematischer Überblick über den ALICE-Detektor.
[CERN132]

In Abb. 3.2 sieht man von links und rechts die Stahlachsen einlaufen (gelb) Zusätzlich sind unten links im Bild zwei Personen für den Größenvergleich mit ALICE eingebracht.

Der verbleibende Teil der Grafik zeigt sämtliche Unterdetektoren
(Von Innen nach Außen, ohne den Myonen-Arm):

- (blau) Kompakt gebaut in der Mitte und somit am nächsten zum Kollisionspunkt befindet sich das “Inner Tracking System (ITS)” mit einer Länge von ca. 1m und einem äußeren Durchmesser von ebenfalls 1m. Dieser Siliziumbasierte Detektor ist auf Spurdetektion ausgelegt. Er soll den Kollisionspunkt bzw. “primären Vertex” mit einer Auflösung unter $100\ \mu\text{m}$ bestimmen und die TPC in der Spur-Rekonstruktion unterstützen. [CERN09]
- (gelb) Um das ITS herum befindet sich das Driftvolumen der TPC. Sie ist speziell auf die Spurbestimmung und Identifikation von Teilchen ausgelegt. Da hier besonders viele Daten anfallen, ist die TPC ein wichtiger Detektor in ALICE.
Nähere Informationen zu Aufbau und Funktion folgen im Unterkapitel 4.3 („Die ALICE-TPC“).
- (grün) Um die TPC befindet sich der “Transition Radiation Detector (TRD)”. Dieser detektiert Übergangsstrahlung, ähnlich der „Cherenkov-Strahlung“. Er dient als Trigger für die TPC und ermöglicht eine bessere Trennung von Elektronen und Pionen.
- (blau) Es folgt der “Time Of Flight (TOF)“-Detektor. Darin befinden sich mehr als 160.000 Multi-gap Resistive Plate Chamber (MRPC)-Platten mit insgesamt 1.4 Millionen Auslesekanälen.
Für die TOF-Methode wird eine gute Zeitauflösung gebraucht, da die kleine Zeit zwischen Kollision und Detektion genau bestimmt werden soll. Dadurch kann eine Teilchen-Identifikation über die verschiedenen Flugzeiten erfolgen. Im TOF-Detektor von ALICE beträgt die Zeitauflösung etwa 150 ps.

Die äußere Hülle teilen sich die folgenden Detektoren:

- (orange) Mit einem Raumwinkel von 107° um die inneren Detektoren, weist das “ElectroMagnetic Calorimeter (EMCal)” Elektronen-Schauer aus Reaktionen von Photonen mit Materie nach. Aufgebaut ist in SShashlikbauweise aus abwechselnden Plastik-Szintillator- und Blei-Platten. Entstehendes Szintillator-Licht wird anschließend nach außen abgeleitet und detektiert. [CERN09]
- (lila) In Abb. 3.2 nach vorne heraus angedeutet schließen die sieben Platten des “High Momentum Particle Identification Detector (HMPID)” an, welche nur einen Raumbereich von etwa fünf Prozent um die anderen Detektoren herum abdecken. Folglich hat dieser Detektor nur eine beschränkte Akzeptanz.
Jede Platte ist ein “Ring Imaging Cherenkov-Detektor (RICH)”, in welchem verschiedene hoch-energetische Teilchen dadurch identifiziert werden, dass sie Cherenkov-Strahlung ringförmig ausstrahlen.
- (lila) Am Boden befindet sich das “PHOton Spectrometer (PHOS)”. Als hochauflösendes elektromagnetisches Kalorimeter für Photonen, soll es die Dynamik und die thermischen Gegebenheiten der Kollision genauer untersuchen. [CERN09]

4 Funktionsprinzip einer TPC

4.1 Allgemeines

Historisches

Entwickelt wurde das Konzept der TPC im Jahr 1974 von David Robert Nygren im Lawrence Berkeley Laboratory (LBL). Bereits 1981 wurde unter seiner Leitung die erste TPC am Stanford Linear Accelerator Center (SLAC) im PEP-4 Detektor zur Erforschung von e^+e^- -Kollisionen in Betrieb genommen.

Aufbau und Grundprinzip

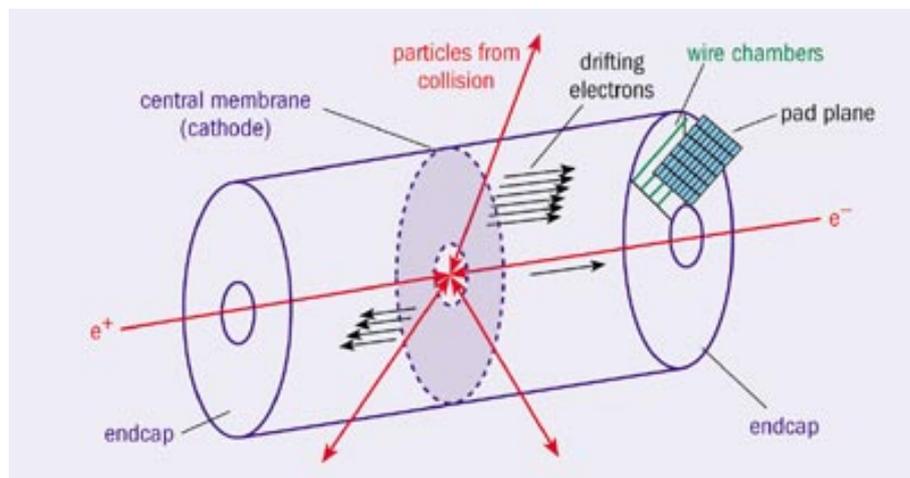


Abb. 4.1: Schema einer TPC als Tank im End-Kappen, MWPC, Kathoden-Ebene, Teilchen-Kollision und resultierenden Elektronen im Driftvolumen. [CERN133]

Abb. 4.1 zeigt den großen zylindrischen Tank einer TPC, welcher in der Mitte durch eine Kathoden-Ebene in zwei kleinere Zylinder geteilt wird. Das komplette Innenvolumen des Tanks wird mit einem Gasgemisch gefüllt, siehe Kapitel 4.2 ("Gas-Wahl"). Die Auslese der Daten erfolgt an den beiden End-Kappen des Tanks, welche als Anoden fungieren. Bisher werden dafür "Multi-Wire Proportional Chamber (MWPC)"-Detektoren verwendet. Deren Funktionsweise wird im Kapitel 4.3 ("Die ALICE-TPC") genauer erklärt.

Wird eine TPC in einen Detektor integriert, so befindet sich der Kollisions-Punkt genau in der Mitte der Kathoden-Ebene, wie in Abb. 4.1 anhand einer e^+e^- -Kollision gut zu erkennen ist.

Entstehende Sekundärteilchen fliegen anschließend in der jeweiligen Kammerhälfte weiter. Sind diese elektrisch neutral, durchfliegen sie die TPC ungestört. Bei geladenen Teilchen wird es hingegen spannender. Diese ionisieren auf ihrem Weg durch die TPC das Gas und erzeugen fortlaufend Elektron-Ion-Paare. Diese Sekundärteilchen bewegen sich anschließend im E-Feld entsprechend zur Kathode oder den Anoden. Dabei erreichen sie im Gas eine statistisch konstante Geschwindigkeit, die Drift-Geschwindigkeit.

Die Elektronen driften zu den Auslese-Ebenen und werden dort zur Analyse vervielfältigt und ausgelesen. Aus der daraus gewonnenen 2d-Ortsinformation und der Zeit, können anschließend sämtliche Spuren der geladenen Teilchen rekonstruiert werden. Befindet sich der gesamte Aufbau zusätzlich in einem Magnetfeld, so lässt sich über die Ablenkung der Primär-Teilchen im B-Feld der Impuls und die Energieverteilung $\frac{dE}{dx}$ der einzelnen Teilchen bestimmen. Da $\frac{dE}{dx}$ proportional zur Geschwindigkeit des Teilchens ist, kann man mit ihr und dem Impuls auf die Teilchen-Masse zurück schließen und somit die Teilchen untereinander unterscheiden.

4.2 Gas-Wahl

Gas	v_D [cm/ μ s]	Diffusion [$\sqrt{\text{cm}}$]		$\omega\tau$	W_i [eV]	N_p [cm $^{-1}$]	N_t [cm $^{-1}$]
		longitudinal	transverse				
Ne/CO $_2$ 90:10	2.73	0.0231	0.0208	0.3425	38.097	13.277	36.821
Ne/CO $_2$ /N $_2$ 90:10:5	2.58	0.0221	0.0209	0.32332	37.285	13.957	36.105
Ne/CO $_2$ /N $_2$ 90:5:10	2.88	0.0231	0.0285	0.38975	37.723	13.659	36.173
Ne/CF $_4$ 90:10	8.02	0.0152	0.0131	1.77023	37.733	15.723	42.663
Ne/CF $_4$ 85:15	8.31	0.0140	0.0119	1.83187	37.519	18.1	48.435
Ne/CF $_4$ 80:20	8.41	0.0131	0.0111	1.84365	37.273	20.49	54.075
Ne/CF $_4$ /N $_2$ 90:10:5	6.96	0.0155	0.0145	1.37991	37.721	16.292	43.363
Ar/CO $_2$ 84:16	1.94	0.0212	0.017	0.25239	29.326	26.937	75.353
Ar/CO $_2$ 86:14	2.28	0.0230	0.0184	0.29648	28.878	26.755	75.111
Ar/CO $_2$ 88:12	2.74	0.0246	0.0199	0.3551	28.966	26.59	74.324
Ar/CO $_2$ 90:10	3.31	0.0262	0.0221	0.43286	28.782	26.413	74.854
Ar/CF $_4$ 90:10	10.77	0.0144	0.0123	2.06624	28.851	28.867	83.059

$E = 400$ V/cm, $B = 0.5$ T

- v_D – Electron drift velocity
- W_i – Mean energy per electron-ion pair for a MIP
- N_p – Mean primary ionisation for a MIP
- N_t – Mean total ionisation for a MIP
- E_i – Minimum ionisation energy

	CO $_2$	N $_2$	Ne	Ar	CF $_4$
E_i [eV]	13.773	15.6	21.56	15.7	15.9

Abb. 4.2: Tabelle verschiedener TPC-Gasmischungen incl. Drift-Geschwindigkeiten und Diffusion. [Ernst1]

Wie in Kapitel 4.1 bereits erwähnt, ist der Tank der TPC mit einem Gas-Gemisch gefüllt. Je nach Experiment muss man das Gas entsprechend anpassen. In der ALICE-TPC ist ein schneller Transport der Elektronen durch die Kammer notwendig, weshalb sie mit einem Gemisch aus Neon und CO $_2$ im Verhältnis 90/10 befüllt wird. Neon stellt in diesem Fall das sogenannte Drift-Gas dar, aus welchem im Laufe der Messung durchgehend Elektronen herausgeschlagen werden. Man verwendet als Drift-Gas ausschließlich Edelgase (He, Ar, Ne, ...), da diese keine unerwünschten Reaktionen innerhalb der TPC eingehen.

Da in einigen Fällen Atome des Drift-Gases aus einem angeregten Zustand heraus Photonen aussenden können, verwendet man zusätzlich ein Löschgas (engl. “Quencher”). Dieses absorbiert entstehenden Photonen, welche anderenfalls weitere Ionisation hervorrufen würden, wodurch unerwünschte Raumladungen generiert werden würden. Gleichzeitig verringert der Quencher die Diffusion der Elektronen in der TPC, wodurch die Auflösung verbessert wird. Leider verringert er auch die Drift-Geschwindigkeit, was ein Nachteil ist. In der ALICE-TPC ist der Quencher zur Zeit CO $_2$. Möglich wäre auch CF $_4$.

Jede Kombination der verschiedenen Gase und deren Mischungsverhältnis zueinander nimmt Einfluss auf die wichtigen Größen wie Drift-Geschwindigkeit der Elektronen (v_D), Diffusion oder die Spurtrennung.

Zur Anschauung wurde deshalb von einem Master-Student aus unserer Arbeitsgruppe eine Tabelle mittels Simulationen erstellt, welche in Abb. 4.2 zu sehen ist.

4.3 Die ALICE-TPC

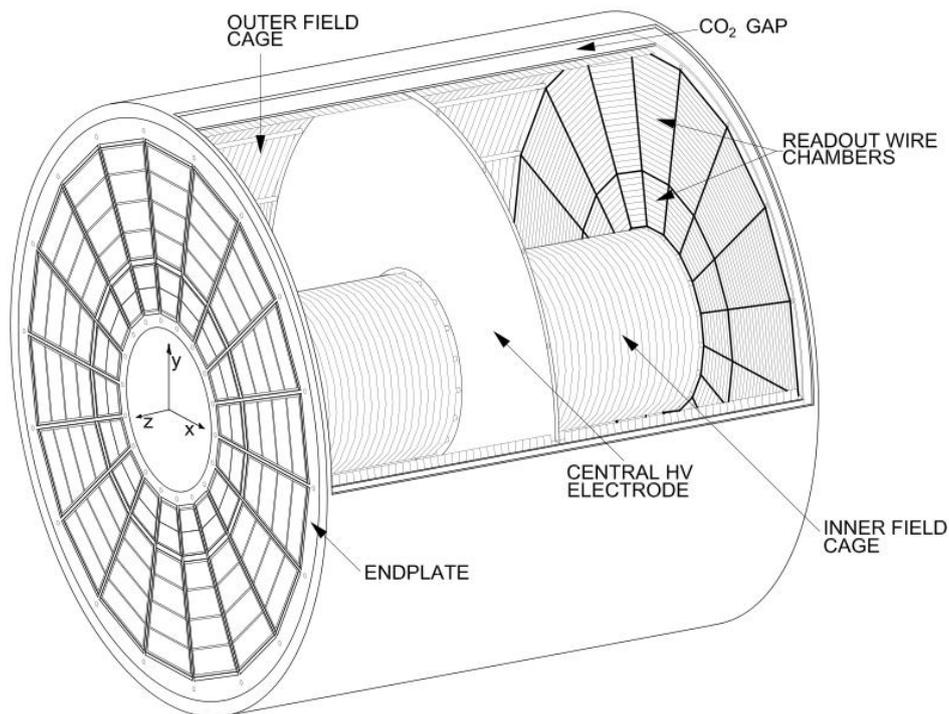


Abb. 4.3: Aufbau ALICE-TPC. [Els13]

Die ALICE-TPC ist mit einem Volumen von ca. 90m^3 einer der größten TPC-Detektoren weltweit. Ihr Radius beträgt 2,8 Meter bei einer Länge von 5m. Mittig befindet sich die Kathode (Siehe Abb. 4.3).

Da sich innerhalb der TPC noch ein weiterer Detektor befindet, besitzt sie zusätzlich zu einem äußeren auch noch einen inneren Feldkäfig. Dadurch wird die Homogenität des E-Feldes und die elektrische Isolation nach Außen gewährleistet.

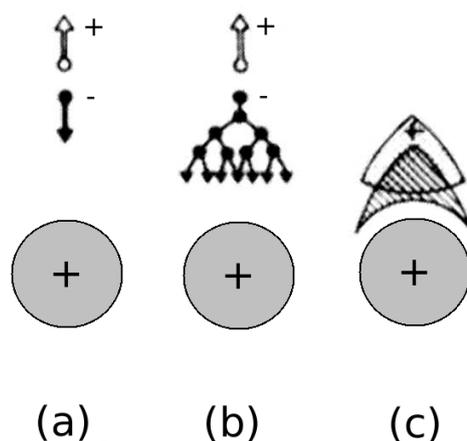


Abb. 4.4: Das schematische Prinzip einer MWPC: Erzeugung von Elektronen und Ionen aus Sekundär-Elektronen an einem positiv geladenen Draht. (a-c) [Peters121]

Ausgelesen wird die ALICE-TPC über MWPCs. In diesen driften die ankommenden Elektronen durch eine Kathoden-Ebene aus Drähten hin zu parallel gespannten Anoden-Drähten, siehe Abb. 4.4 (a).

Zu diesen hin werden sie beschleunigt und produzieren auf ihrem Weg Sekundärelektronen und -Ionen (b).

Die entstehende Elektronen-Wolke driftet anschließend zum Draht und wird dort angeleitet und gemessen. (c)

Dieses Prinzip wird nun vielfach nebeneinander angewendet, um eine Ortsmessung der Teilchen zu erhalten.

Da es technisch nicht anders umsetzbar ist, sind die im Kreis angeordneten Ausleseammern zusätzlich noch in “Inner ReadOut Chamber (IROC)” und “Outer ReadOut Chamber (OROC)” unterteilt.

Die Unterdrückung des IB erfolgt in der ALICE-TPC mit MWPCs über ein sogenanntes “Gating-Grid”. Dieses Gitter besteht aus parallel angeordneten Drähten vor der eigentlichen MWPC. Es wird abhängig von Trigger-Signalen der anderen Detektoren von Null auf ein negatives Potenzial und anschließend zurück gesetzt. So werden zunächst Elektronen hinein gelassen, entstehende Ionen werden jedoch abgefangen. Danach beginnt die neue Messung. Der große Nachteil dieser Methode ist, dass die TPC dadurch nicht dauerhaft sondern, wie bereits erwähnt, getriggert betrieben wird und dadurch keine kontinuierliche Messung erfolgen kann.

Um diese Totzeit, als die Zeit in der ein Detektor keine Messungen nehmen kann, zu vermeiden, soll die Auslese der TPC auf die im folgenden Kapitel beschriebenen GEM-Detektoren umgerüstet werden.

4.4 Ion-Backflow

Im letzten Absatz über das Prinzip einer TPC wurde erklärt, dass geladene Teilchen das Gas der TPC ionisieren. Dementsprechend entstehen neben den zur Detektion wichtigen Elektronen auch entsprechend viele Ionen.

Ionen sind im Aufbau der TPC jedoch ein großer Störfaktor, da sie aufwändige Korrekturen im E-Feld erfordern. Ohne diese würden die nachfolgenden Elektronen falsch abgelenkt werden, was wiederum die Gesamtauflösung der TPC enorm reduziert.

Während im Driftvolumen selbst bereits durch die Primärionisation Ionen entstehen, stellen jedoch die Auslese-Ebenen die größten Herausforderungen in Hinsicht auf Ionen dar. Hier werden wie bereits beschrieben die Elektronen zur Detektion vervielfacht. Da diese Verstärkung bis zum 1000-fachen reicht, entstehen aus einem Elektron bis zu 1000 Elektronen, jedoch auch 1000 Ionen. Würde man sie ungehindert driften lassen, würden von den Auslese-Ebenen aus ein konstanter großer Strom an Ionen zurück durch das Volumen zur Kathode fließen. Dies gilt es jedoch zu verhindern.

Hierzu wurde der IB definiert:

$$IBF = \frac{\# \text{ Ionenstrom an der Kathode}}{\# \text{ Elektronenstrom an der Anode}}$$

Je nach Art der Auslese in der TPC muss man sich entsprechende Methoden überlegt werden, wie man dabei den IB möglichst klein hält.

Im Kapitel 4.1 (“Die ALICE-TPC”) wird unter anderem die bisherige Lösung in ALICE erläutert, während zu Ende des Kapitels 5.1 (“ Allgemeines zu GEM-Folien”) die entsprechende Alternative mit GEM-Folien erklärt wird.

5 GEM-Folien

5.1 Allgemeines

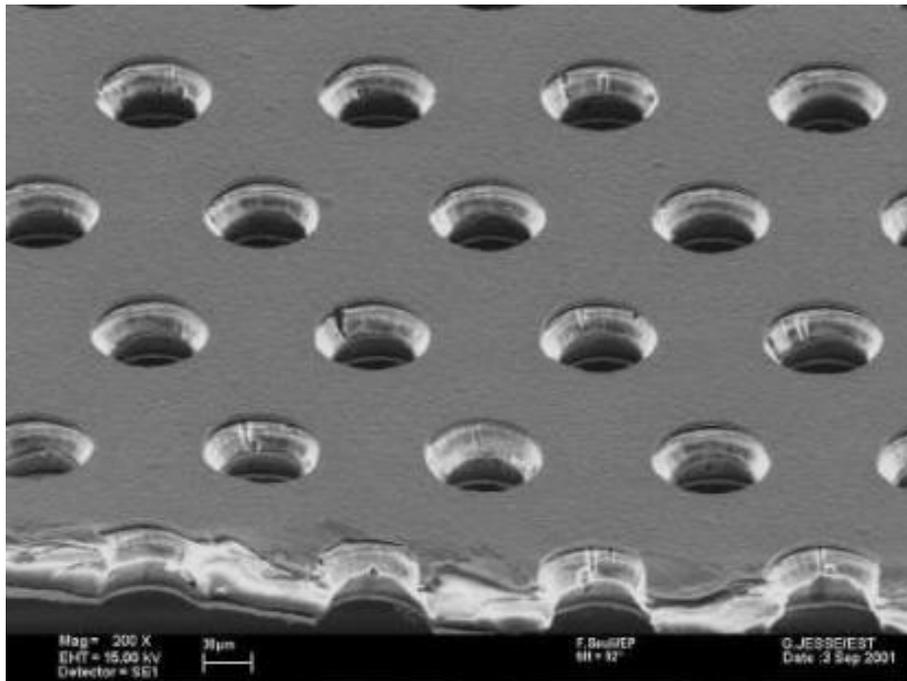


Abb. 5.1: Rasterelektronenmikroskop-Aufnahme einer GEM-Folie mit konisch zulaufenden Löchern. [Desy131]

Aufbau

Die Abkürzung GEM steht für engl. “Gas Electron Multiplier“.

Standard-GEM-Folien bestehen aus einer $50\mu\text{m}$ Kapton- Schicht, welche beidseitig mit $5\mu\text{m}$ Kupfer bedampft wird. Kapton gehört zur chemischen Gruppe der Polyimide, ist temperaturbeständig bis 230°C und mit einem sehr hohen spezifischen Volumenwiderstand auch in kleinen geometrischen Dimensionen ein sehr guter Isolator. Kupfer hingegen ist einer der besten metallischen Leiter.

Durch diese drei Schichten werden durch Ätzen an beide Seiten zur Mitte hin konisch zulaufende Löcher erzeugt. Erzeugte Löcher haben einen Durchmesser auf der Oberfläche von $70\mu\text{m}$ und einen Abstand zueinander von $140\mu\text{m}$. Durch das konische Zulaufen zur Mitte hin haben die Löcher im inneren der Folie einen minimalen Durchmesser von $50\mu\text{m}$. Die beschriebene Geometrie lässt sich an Abb. 5.1, einem Bild eines Rasterelektronenmikroskops, gut nachvollziehen.

Funktionsprinzip

GEM-Folien werden grundsätzlich in einer Gas-Atmosphäre betrieben, wobei die Gas-Mischung wie in Kapitel 4.2 (“Gas-Wahl”) beschrieben, gewählt werden kann.

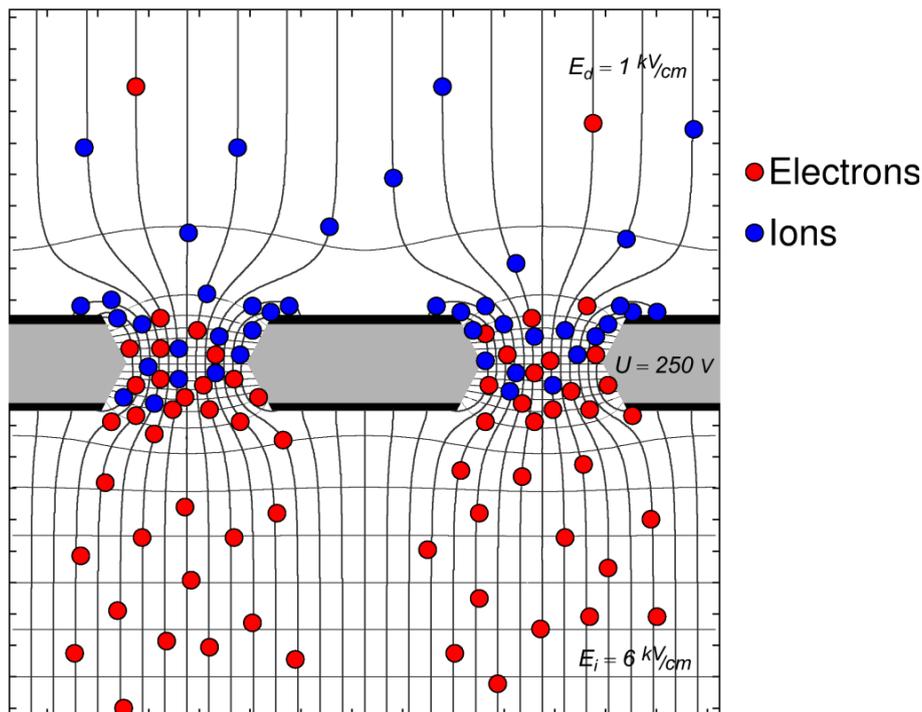


Abb. 5.2: Feldverlauf in den Löchern der GEM-Folien mit bildlich dargestelltem Avalanche-Effekt. [Desy132]

Anschließend werden die untere und die obere Kupferschicht der Folie auf verschiedene Potentiale gelegt, sodass zwischen der Ober- und der Unterseite der Folie eine Spannung von einigen 100 V entsteht. Aufgrund der hohen Potentiale und der Geometrie der Folie baut sich in den Löchern ein hohes elektrisches Feld auf, was in Abb. 5.2 durch besonders dichten Feldlinien dargestellt wird.

Dadurch tritt dort für die eintreffenden Elektronen ein beschleunigendes Feld auf, sodass sie das in der Kammer enthaltene Gas ionisieren. Die entstehenden Elektronen werden wiederum beschleunigt, wodurch eine Ladungsverteilung entsteht, in der die schnellen Elektronen voraus driften und langsamen positiven Ionen zurückfallen. Dadurch werden entsprechend viele Ionen auf die obere negativ geladene GEM-Seite gezogen, während nur wenige entstehende Elektronen auf der unteren positiv geladenen Seite verloren gehen, wie in Abb. 5.2 verdeutlicht wird.

Dieser sogenannte Avalanche-Effekt ist von Vorteil, da so eine hohe Gas-Verstärkung erzeugt wird, sprich eine große Anzahl erzeugter Sekundärelektronen zur Auslese gelangen kann, während nur eine geringe Anzahl an Ionen in das Drift-Volumen vor der GEM zurück driften.

5.2 Multi-GEM

Nutzt man statt nur einer GEM-Folie mehrere Folien hintereinander, ergeben sich ganz neue Möglichkeiten den Gain und den IB zu variieren. [Buz02]

Zunächst erhöht man den Gain sehr stark, da nun Ionisation auf mehreren Ebenen. Man kann nun für den gleichen Gain mit mehreren Folien bei deutlich niedrigeren Spannungen arbeiten, als man sie bei einer GEM bräuchte.

Durch kombinieren der Spannungen zwischen den Folien kann man den Rückfluss der Ionen verringern. Bisher ist die gängige Lösung mit drei GEM-Folien, dass man die Spannungen an den GEMs nacheinander steigen lässt. Die Transfer-Feldern werden hingegen sind zwischen GEM 1 und GEM 2 + GEM 3 und der Kathode sehr hoch (bis zu $5000 \frac{V}{cm}$) und zwischen GEM 2 und GEM 3 wiederum sehr niedrig (bis zu $100 \frac{V}{cm}$) eingestellt.

An GEM 1 erhält man dadurch eine gute Verstärkung und erzeugt zwar nach GEM 3 sehr viele Ionen, kann diese daraufhin jedoch an der zweiten GEM nahezu komplett heraus filtern. Variiert man nun die Parameter Anzahl, Art und Position der GEMs zueinander, ergeben sich viele Varianten die, noch zu studieren sind. Ein Beispiel eines Multi-Gem-Aufbaus ist in Abbildung 5.3 zu sehen.

Eine andere Methode zur Unterdrückung des IB wurde in [Lya06] verfolgt. Hier wurden spezielle GEM-Folien entworfen, welche gesonderte Potenzial-Streifen beinhalten. Dadurch konnte eine Reduzierung des IB um eine Größenordnung erreicht werden.

5.3 Anwendungsmöglichkeiten

Seit der Entwicklung der GEM-Folien im Jahr 1997 [Sau97] wurden GEM-Folien schon vielfältig verwendet. In manchen TPCs wird überlegt mit der Zeit die Auslese-Ebenen von Wire- oder Strip-Ebenen auf GEMs umgestellt. So wurde für das Panda-Experiment an der GSI bereits ein GEM-Prototyp entwickelt und gebaut. [Fab10]

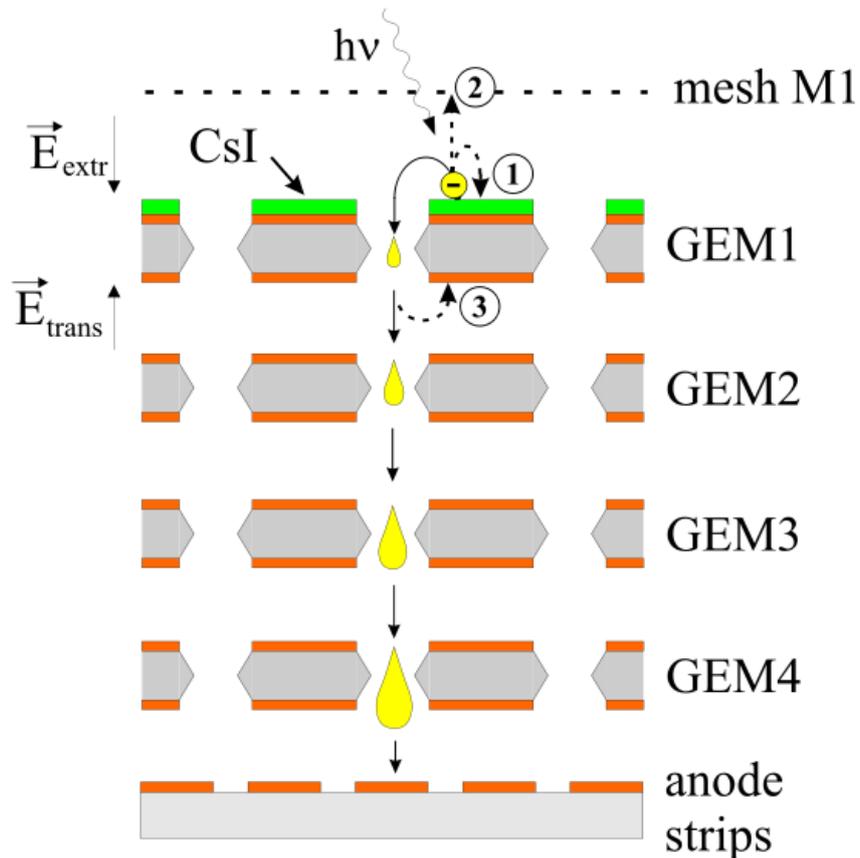


Abb. 5.3: GEM-Folien als Photo-Detektor mit entsprechend beschichteter GEM1 und anschließender Verstärkung und Auslese des Elektrons.[CERN134]

Das ursprüngliche Feld der Anwendung von GEM-Folien ist der Nachweis von Photonen. Hierbei wird wie in Abbildung 5.3 zu sehen eine Photonen-sensitive Lage auf die GEM-Folie aufgetragen. Alternativ kann auch ein entsprechend beschichtetes Fenster vor den GEMs angebracht werden [Buz00].

Trifft ein Photon auf diesen Bereich, löst es dort per Photoeffekt ein Elektron aus, welches anschließend weiter wie bisher bekannt vervielfacht und zum Schluss detektiert wird.

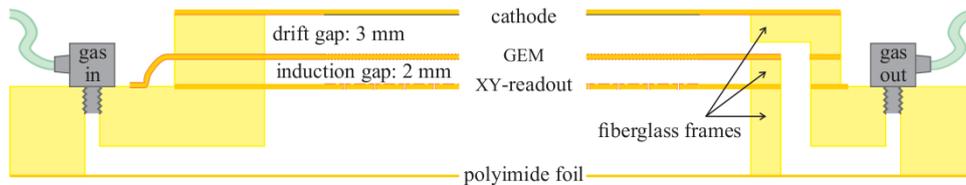


Abb. 5.4: Kammer zur Beam-Analyse. [Pin08]

In einem anderen Paper wird werden GEM-Folien zur Beam-Analyse in einem Anti-Protonenstrahl verwendet. [Pin08]

Hierzu baut man eine einfache Kammer mit einer einzelnen GEM, Kathode und Auslese-Ebene und entsprechenden Gasanschlüssen, wie in Abb. 5.4 dargestellt wird. Dieser Detektor wird anschließend an entsprechender Stelle im Beschleuniger-System installiert und kann bei Bedarf in den Strahl gefahren werden, um diesen zu prüfen.

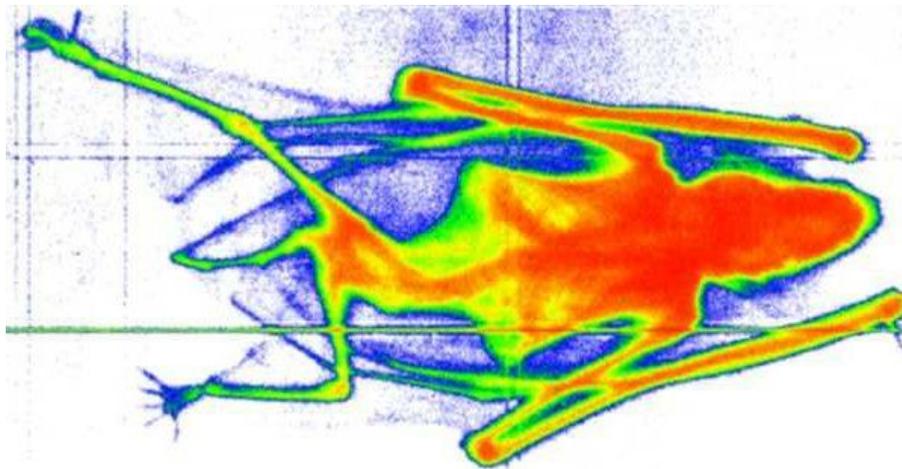


Abb. 5.5: Eingefärbte GEM-Radiographie einer Fledermaus mit 8 keV Röntgenstrahlung. [CERN135]

Eine besonders anwendungsorientiertes Anwendungsgebiet für GEMs ist die Radiographie. In Abb. 5.5 wurde eine Fledermaus mit 8 keV Röntgenstrahlung bestrahlt. Anschließend wurde die Strahlung ähnlich wie in [Buz00] detektiert und optisch ausgewertet. [Sau97]

6 Experimentelle Vorbereitung

6.1 GEM-Kontrolle

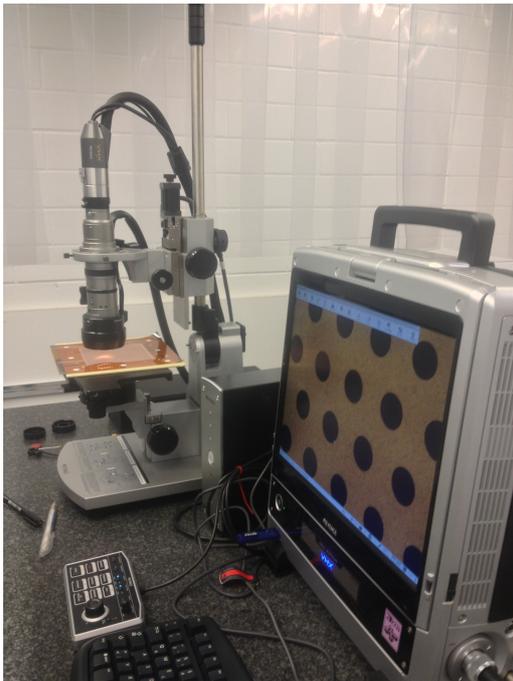


Abb. 6.1: Mikroskop für GEM-Test. [Eig1]



Abb. 6.2: Spannungstest. [Eig2]

Als ersten Test mussten die am CERN gefertigten GEM-Folien optisch auf Fehler untersucht werden. Um die Untersuchungen in einer möglichst staubfreien Umgebung zu gewährleisten musste neben der persönlichen Reinraum-Kleidung wie Kittel, Maske, Haarnetz und Handschuhen, auch eine Flowbox verwendet werden. Diese saugt extern Luft an, filtert diese und bläst sie anschließend über die geschützte Arbeitsfläche. Diese Maßnahmen sind nötig um die feinen GEM-Folien fusel-frei und sauber zu halten, und somit spätere Kurzschlüsse zu verhindern.

War dies alles gewährleistet, wurden die Folien unter ein Mikroskop gelegt und systematisch abgefahren (Abb. 6.1). Das an einen PC übertragene Bild wurde anschließend kontrolliert. Bei Auftauchen von Fehlerstellen wurden diese per Foto festgehalten um sie später zu besprechen. Bis auf einige nicht nennenswerte kleinere Fehlerstellen ist bei diesem Verfahren bloß eine Folie besonders aufgefallen, bei der ein GEM-Loch im Kupfer außerhalb des normalen GEM-Bereichs gefunden wurde.

Anschließend wurden alle Folien einem Spannungstest unterzogen. Hierfür werden immer zwei GEMs nebeneinander in eine provisorische Testkammer gelegt, an ein Hochspannungsterminal angeschlossen und für zwei Stunden mit N_2 geflutet (Abb. 6.2). Nach genügend Spülen der Kammer werden die Folien einzeln in Intervallen von 50 V

von 0 V bis 600 V getestet. Parallel zur angelegten Spannung wird der auftretenden Strom kontrolliert. Bei Fehlern kam es teilweise vor, dass entweder leichte Ströme oder sogar Überschläge in Form kleiner Blitze auf der Folie auftraten. Meistens liegen die Fehler jedoch in Form von Verunreinigungen in den Löchern vor, welche sich bei genügend Spannung "ausbrennen" lassen. Lediglich bei einer Folie traten konstant sehr hohe Ströme auf. Diese sollte gezielt mittels eines stärkeren Netzteils ausgebrannt werden. Eine Kohlenstoff-Spur in der Folie erzeugte jedoch einen Kurzschluss in Form einer starken Entladung, sodass ein Loch von mehreren Millimetern in der Folie entstand, was diese Folie für die weitere Verwendung unbrauchbar machte. Alle anderen Folien können gespannt und auf Rahmen geklebt werden. Hierfür werden die Folien zunächst für kurze Zeit in einen Ofen gelegt, um sich etwas ausdehnen zu können. Anschließend werden sie auf einem Plexiglas-Rahmen mit speziellem Klebeband fixiert und gespannt, um die Folie möglichst eben und ohne Falten weiterzuverarbeiten. Ist das Gegenstück des Rahmens angeschraubt, können, nach erneutem Erhitzen im Ofen, kann die Folie mittels Epoxy-Kleber auf entsprechende Pieberglass-Rahmen geklebt werden. Nach einer Nacht im Ofen bei 60°C ist der Kleber aushärtend. Abschließend wird die überstehende Folie abgeschnitten. Die GEM ist nun bereit zur weiteren Verwendung.

6.2 Testkammer

Den Mittelpunkt des Experiments bildet eine quaderförmige Testkammer aus Aluminium. Sie wurde im Rahmen einer Masterarbeit am Institut für Kernphysik Frankfurt (IKF) entworfen und in den universitätseigenen Werkstätten gefertigt.

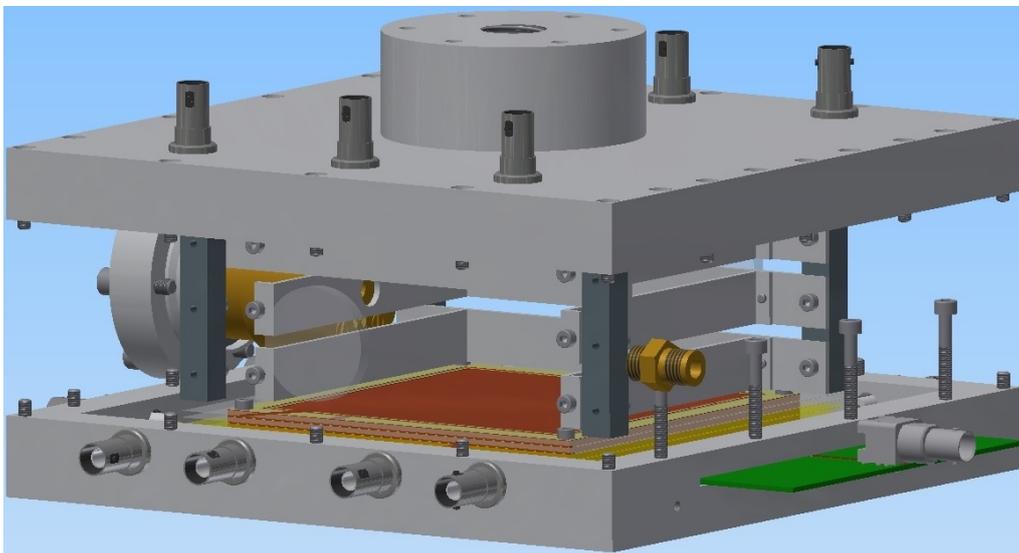


Abb. 6.3: CAD-Bild der Testkammer ohne Seitenwand. Gezeigt werden Deckel und Boden mit den zugehörigen HV-Anschlüssen. Im Hintergrund erkennt man links die Eisen-Quelle. Ebenso sind die Steifen des Feldkäfigs und die GEM-Folien, sowie die Anoden-Platine zu sehen. [Schell13]

Der Körper der Kammer besteht aus einem Seitenteil und je einer Deckel- und einer Boden-Platte. In Abb. 6.3 wurde das Seitenteil zur Sichtbarkeit des Kammer-Inneren ausgeblendet.

Seitenteil Im Seitenteil sind gegenüberliegend zwei Quarz-Gläser eingelassen, um die Möglichkeit zu haben, einen Laser durch die Kammer strahlen zu lassen. Orthogonal zu dieser Achse ist zusätzlich an einer Seite ein verschließbare Öffnung angebracht. Mit einem zusätzlichen PVC-Abstandsstück ist es an dieser Stelle mögliche eine radioaktive Quelle zu montieren. Zusätzlich sind am Seitenteil zwei Anschlüsse für Gas-Ein- und -Auslass angebracht.

Verwendete Quelle Bei der von uns verwendete Quelle handelt es sich um eine ^{55}Fe -Quelle. Diese emittiert γ -Quanten mit einer Energie von 5,9 keV. Die Halbwertszeit beträgt hierbei 2,73 Jahre.

Boden In der Seite des Bodenteils ist eine lange, flache Öffnung eingelassen, die einen einfacheren Wechsel der Anoden-Platine ermöglicht. Diese wird in ein entsprechendes Gegenstück eingeklebt, welches in die Öffnung im Boden eingeschraubt wird. 2 mm über der Auslese-Platine sind die GEM-Folien in einem Abstand von 2 mm zueinander angebracht. Die Anschlüsse für die Spannungsversorgung der Folien sind ebenfalls in die Seite des Bodenteils eingelassen.

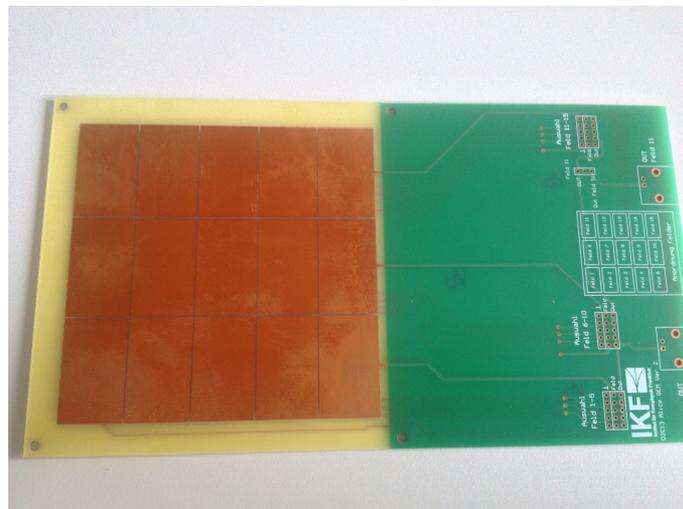


Abb. 6.4: Die segmentierte Anoden-Platine mit Pins zur variablen Verschaltung. [Eig3]

Auslese-Platine Während es sich bei der Kathoden-Platte um eine einfache Kupfer-Platte handelt, ist die Anoden-Platine, wie in Abb. 6.4 zu sehen, segmentiert und entsprechend verschaltet, um die Segmente auch einzeln auslesen zu können.

Deckel An der Innenseite der Deckelplatte ist eine im Institut gefertigte Drahtebene angebracht. Direkt darüber befindet sich ein Feldkäfig aus drei Aluminiumstreifen. Diese sind an vier PVC-Beinchen angebracht. Um die Beinchen am Deckel und den Feldkäfig zu fixieren sind ausschließlich Plastik-Schrauben verwendet worden, da so die Gefahr von Kurzschlüssen oder Feldspitzen vermindert wird. Anschlüsse für Feldkäfig und Drahtebene wurden in die Deckelplatte eingelassen, sodass Deckel und andere Kammerteile nicht miteinander verbunden waren und die Kammer ohne Komplikationen geöffnet und auseinander genommen werden kann. Auch auf der Deckelplatte wurde eine verschließbare Öffnung eingelassen. Hier kann eine α -Quelle montiert werden.

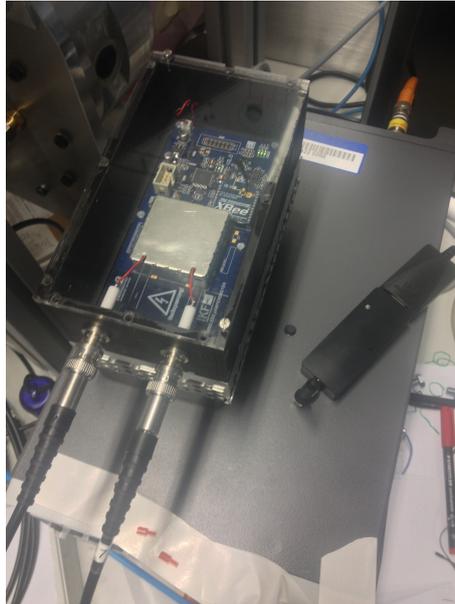


Abb. 6.5: Sender und Empfänger des Kathoden-Signals. [Eig4]

Storm-Auslese Kathode Da die Kathoden-Platte auf Hochspannung liegt, gestaltet sich die Auslese des Signals per Kabel als unmöglich. Als Lösung wurde eine haus eigene kabellose Methode über Funk in der Elektronik-Gruppe konstruiert (Abb. 6.5). Die Platte ist über Kabel mit einer Sendeeinheit verbunden. Diese ist zur Isolation in eine PVC-Box eingelassen. Betrieben wird sie über eine Photodiode, welche von einer leistungsstarken Leuchtdiode bestrahlt wird. Dadurch ist die Sendeeinheit isoliert und kann trotzdem im Dauerbetrieb genutzt werden. Eine induktive Lösung wäre zwar energieeffizienter, würde jedoch Störsignale in der Elektronik hervorrufen. Das Funksignal der Sendeeinheit kann per Empfänger am PC ausgelesen und in einem “LabView”-Programm ausgegeben werden. [Schrei13]

Strom-Auslese Anode Die kleinen Ströme der Anoden-Platte wurden mit einem pA-Meter der Firma “Keithley” [Keith13] gemessen. Bei Bedarf konnten die Pads einzeln vermessen werden.

6.3 Software

Um Steuerung und Auslese der Spannungen und Ströme zu ermöglichen, erfolgte diese zentral über ein GUI auf einem LINUX-PC. Manuell ließe sich diese Arbeit kaum realisieren, da sämtliche in der Kammer einstellbaren Spannungen immer parallel auf- bzw. abgefahren werden müssen um Überschläge zu vermeiden.

Ein Großteil des Programmes wurde uns bereits fertig von der GEM-Gruppe der TUM München zur Verfügung gestellt. [Kai13]

Die Steuerung selbst erfolgt auf einem im Qt4-Designer erzeugten GUI, welches im Hintergrund an ein in C++ geschriebenes Programm geknüpft ist.

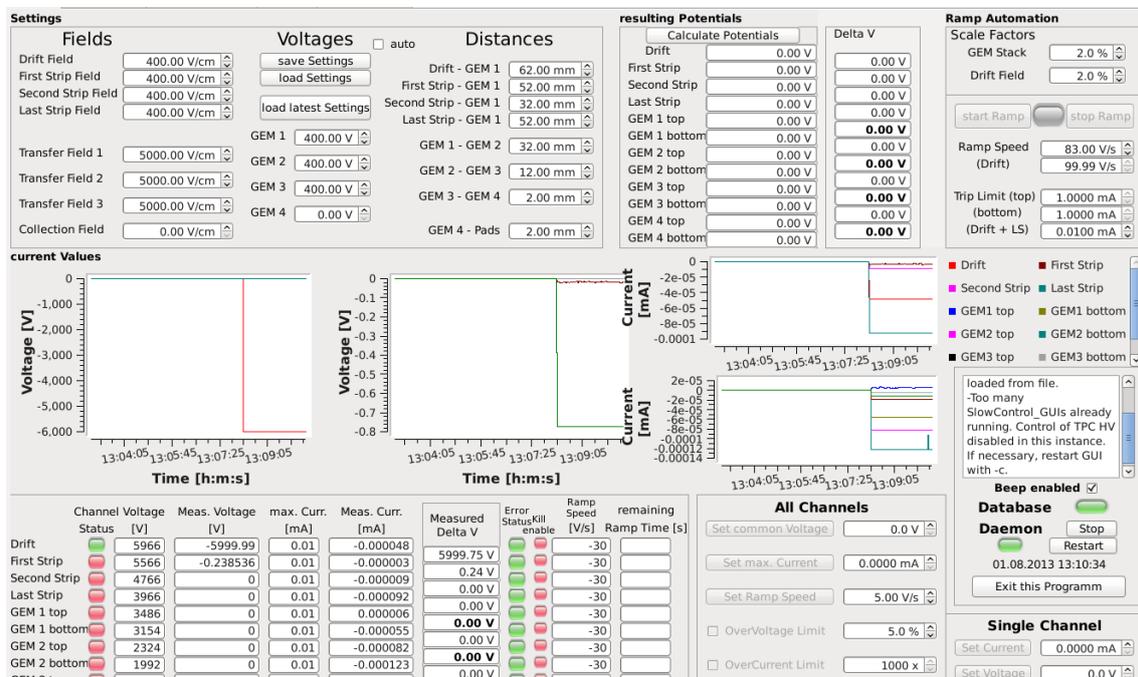


Abb. 6.6: Hauptfenster des GUI. [Eig5]

Im Hauptfenster, welches in Abbildung 6.6 zu sehen ist, werden in der oberen Hälfte sämtliche Spannungen eingestellt. Zusammen mit den eingestellten Werten für die geometrischen Dimensionen zwischen den verschiedenen Spannungs-Punkten, werden daraus automatisch die zu anzulegenden Potenziale in der Kammer errechnet. Diese kann man aufgeteilt in GEM- und Drift-Potenziale von 0 bis 100 % skalieren, bevor man die Potenziale tatsächlich "rampen" lässt, sprich langsam bis auf den gewünschten Wert ansteigen lässt.

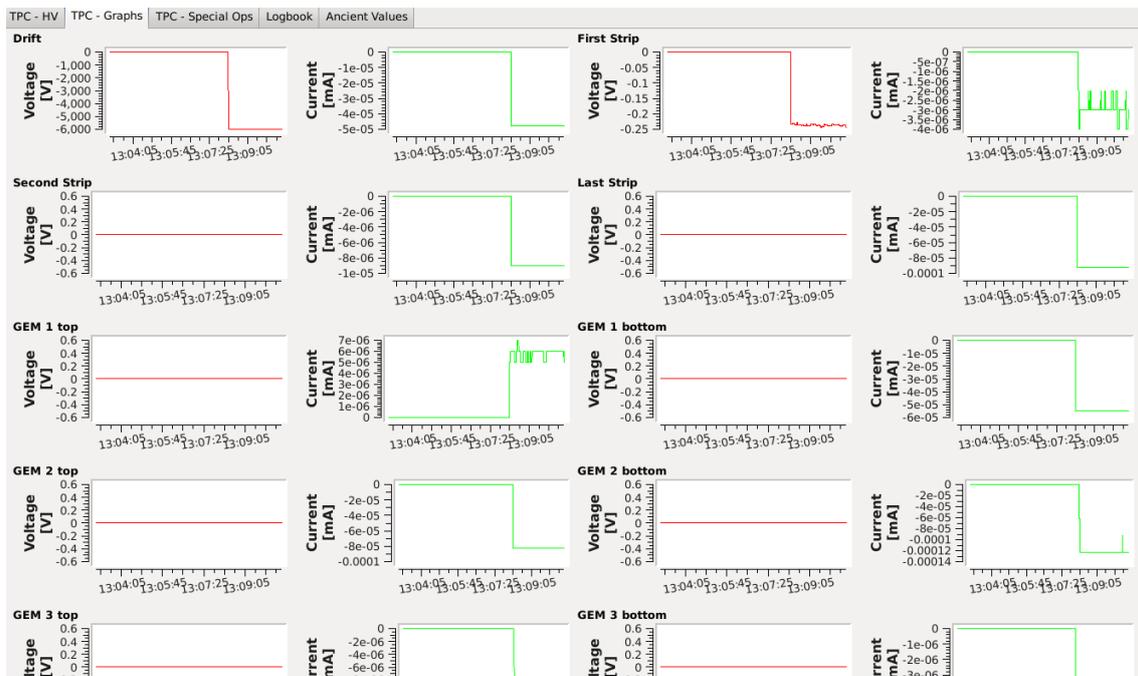


Abb. 6.7: Plots im GUI.[Eig6]

Das Hauptfenster zeigt zusätzlich Ströme und Spannungen in vier Plots zusammengefasst. Zur genaueren Analyse werden diese im zweiten Reiter (Abb. 6.7) alle noch einmal einzeln aufgezeichnet.

Weitere Funktionen des GUI sind die Korrektur für defekten GEM-Fläche in die Messungen und eine Ausgabe und Archivierung der Messungen.

Auch ohne angelegte Spannung traten an den Gem-Folien kleine Ströme auf. Diese sind als Artefakte der Nullpunkts-Verschiebung der vorliegenden Hochspannungs-Module der Firma iseg anzusehen. [Iseg13]

Eine meiner Tätigkeiten bestand darin eine Offset-Messung der Ströme zu implementieren. Hierzu wurden in einem neuen Bereich des GUI die Messwerte sämtlicher Ströme über mehrere Messungen gemittelt und anschließend dauerhaft von den aktuellen Strom-Messwerten abgezogen. Dadurch konnte im Ruhezustand der Kammer der Offset bestimmt und abgezogen werden, sodass später die tatsächlich gemessenen Ströme angezeigt werden konnten.

7 Experimentelle Durchführung

Parameter die am GUI zur **Steuerung** der Testkammer variiert werden können, sind:

Variable	Wertebereich
Driftfeld & Feldkäfig	konstant 400 V/cm
GEM-Spannungen	je 0-400 V
Transferfelder	je 0-6000 V

Anhängig von der Zahl der eingebauten GEM-Folien (3 oder 4) variiert entsprechend die Anzahl der einstellbaren GEM- und Transferfeld-Spannungen.

Ausgelesen werden konnten zum Schluss die Werte:

Variable	Wertebereich
Strom auf Anode	in nA
Strom auf Kathode	in nA

Misst man nun den Strom auf der Anode ohne Spannung auf den GEM-Folien, treffen nur die Ionen der Primär-Ionisation auf die Kathode und man erhält $I_{\text{primär}}$.

Führt man anschließend die Spannungen der GEMs und Transferfelder hoch, so erhält man auf der Anode den Strom der Sekundärionisation $I_{\text{sekundär}}$ nach Gasverstärkung.

Mittels der beiden Ströme lässt sich die Gas-Verstärkung wie folgt bestimmen:

$$\text{Gas-Verstärkung} = \frac{I_{\text{sekundär}}}{I_{\text{primär}}}$$

Da sich der Strom an der Kathode ausschließlich aus den positiven Ionen zusammensetzt, lässt sich der IB in unserem Fall ausdrücken durch:

$$\text{IB} = \frac{I_{\text{Kathode}}}{I_{\text{Pad}}}$$

Um später die Abhängigkeit des IB von der Rate der ^{55}Fe -Quelle zu studieren, wurden verschieden viele Lagen Aluminium-Folie als Absorber vor die Öffnung der Quelle geklebt.

Um in dieser Messung Reproduzierbarkeit zu erhalten, wird eine konstanten Gas-Verstärkung gebraucht. Diese wurde mittels eines Analog to Digital Converter (ADC)'s anhand der Position der Eisen-Kennlinie kontrolliert.

Hierzu wurde das Pad [5,3] von Abb. 8.1 der Anode gesondert gemessen und über eine analoge Messkette aus Vorverstärker und Puls-Former einem ADC mit Vielkanalanalysator zugeführt.

Die Gas-Verstärkung wurde zuvor ohne Aluminium vor der Quelle mittels Kontrolle über Primär-Ionisation und den Anoden-Strömen auf 1000, 2000 und 3000 eingestellt. Nun konnten die entsprechende Peak-Position auf dem ADC ermittelt und notiert werden.

Um in den folgenden Messungen die Gas-Verstärkung entsprechenden reproduzieren zu können, kann man sich nun an den bestimmten Peak-Positionen orientieren und bei drei Gems die letzte bzw. bei vier Gems die letzten beiden Gems entsprechend nachregeln.

8 Analyse und Auswertung

8.1 Erste Überlegungen

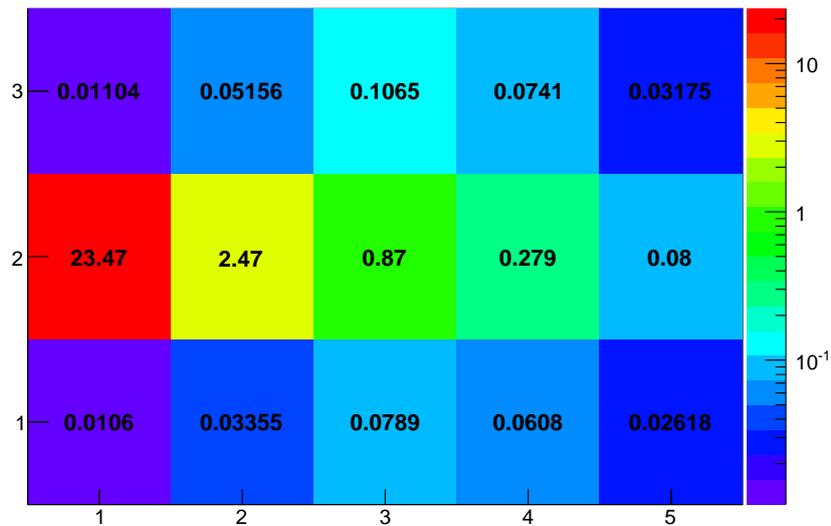


Abb. 8.1: Ströme [nA] auf der Anoden-Platine mittels Einstrahlung der Fe-Quelle von links in Ar/CO₂. [Eig7]

Ein wichtiger Bestandteil der Arbeit an der Testkammer war die Abhängigkeit des IB von der Rate der ⁵⁵Fe-Quelle zu vermessen.

Um die Verteilung der Ionisation über die Fläche des Pads zu vermessen, konnten man die segmentierte Pad-Ebene ein Segment nach dem anderen auslesen und die Ströme anschließend in einem Histogramm darstellen. (siehe Abb. 8.1)

Geplottet sind die Ströme in nA auf jedem Feld. Man sieht gut, wie die Quelle an der linken Seite des Histogramms mit hoher Intensität einstrahlt. Im mittleren Streifen fällt die Strahlungsintensität nach rechts nahezu exponentiell ab. Der Abfall verläuft jedoch nicht rein exponentiell, da die Quelle von ihrer Öffnung aus kegelförmig in alle Raumrichtungen gleichmäßig ausstrahlt. Daher fliegen im mittleren Streifen vor allem über die ersten beiden Felder von links verhältnismäßig mehr Gammas durch den Drift-Raum, als über dem Rest der Pads. In diesen beiden Feldern wird der Strom deshalb stark erhöht.

In den äußeren Streifen steigt die Intensität bis zur Mitte und fällt anschließend ab. Dies lässt sich durch den Öffnungswinkel der Fe-Quelle erklären. So kommen in den Eck-Bereichen in Pad (1,3) und (1,1) kaum Gammas an, da der Kegel der Quelle zu eng ist. In Spalte zwei kommen schon etwas mehr Gammas an, bis der Kegel in der dritten Spalte die kompletten Pads bestrahlt.

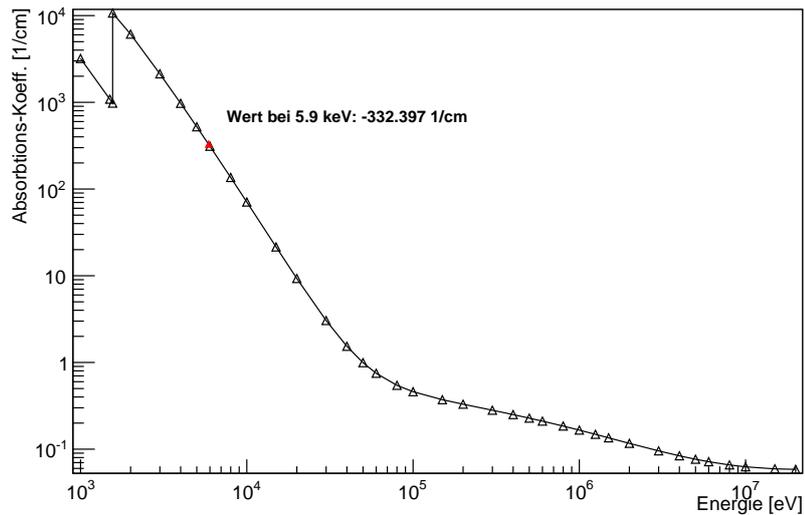


Abb. 8.2: Absorptions-Koeffizient als Funktion der Energie der γ . [Eig8]

Nun wurde die Fe-Quelle mit einem Absorber aus Aluminium versehen. Aus Werten des National Institute of Standards and Technology (NIST) wurde Abb. 8.2 geplottet. [NIST13] Da der Graph im Bereich um 5.9 keV nahezu linear verläuft, war der entsprechende Absorptions-Koeffizient von $332,397 \frac{1}{cm}$ gut zu interpolieren.

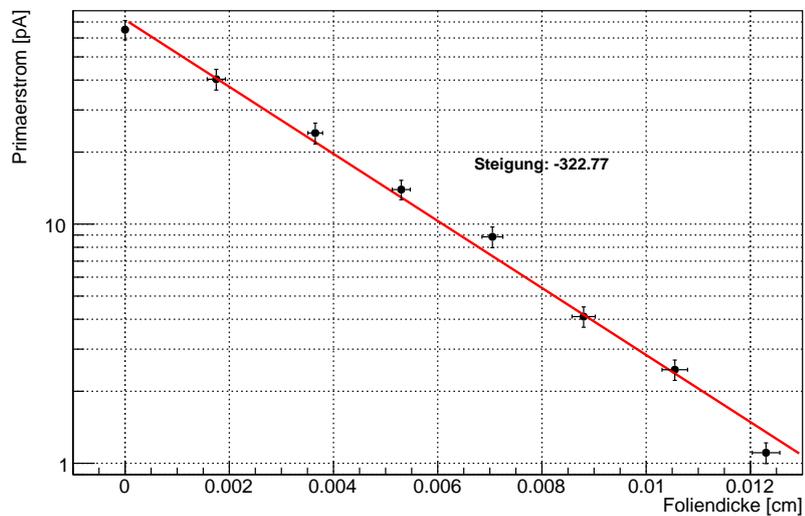


Abb. 8.3: Log-Plot der Primär-Ionisation. [Eig9]

Diesen Wert konnten wir nun an unserem Aufbau überprüfen. Für eine Reihe von Aluminium-Folien vor der Quelle wurde jeweils die Primär-Ionisation in der Kammer bestimmt. Der resultierende Graph hat einen exponentiellen Verlauf. Plottet man die Primär-Ionisation logarithmisch, erhält man demnach eine lineare Funktion (siehe Abb. 8.3). Deren Steigung von $-322,77 \frac{1}{cm}$ wiederum stellt den tatsächlichen Absorptions-Koeffizienten dar und passt sehr gut zum theoretisch bestimmten Wert.

8.2 Erste Messung Ratenabhängigkeit

Die GEM-Kombination in dieser Messung bestand aus 3 GEMs (Standart-GEM; Standart-GEM; Standart-GEM).

8.2.1 Messergebnisse roh und im Verhältniss zur Primär-Ionisation

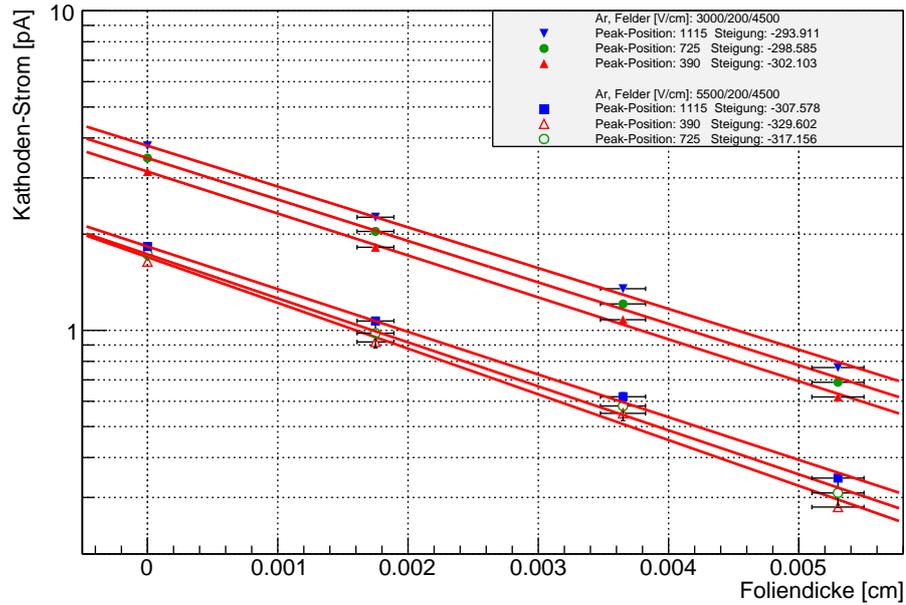


Abb. 8.4: Log-Plot der Kathoden-Ströme. [Eig10]

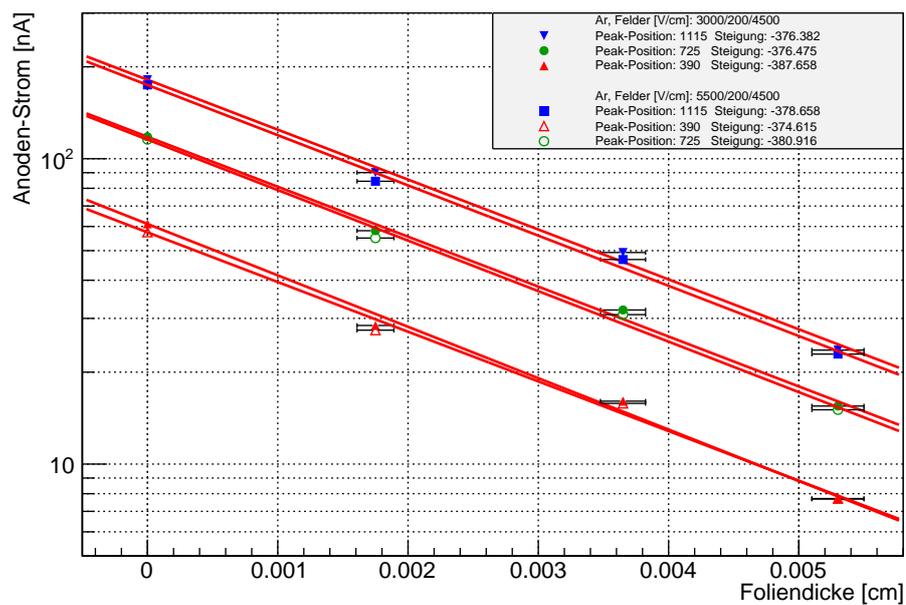


Abb. 8.5: Log-Plot der Anoden-Ströme. [Eig11]

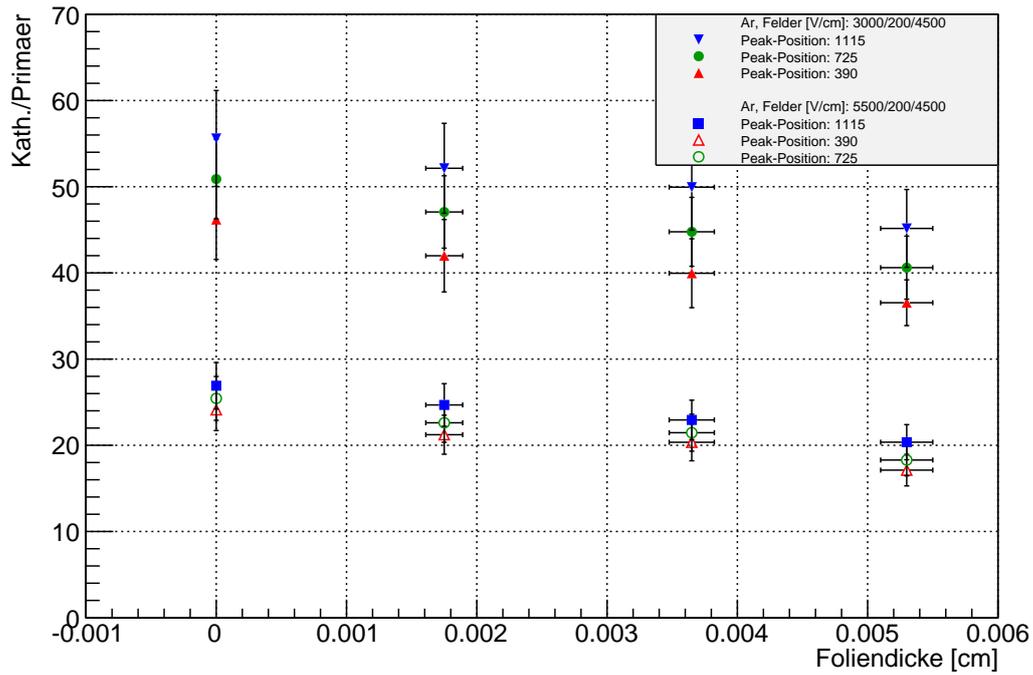


Abb. 8.6: Kathode/Primär Raten-Abhängig. [Eig12]

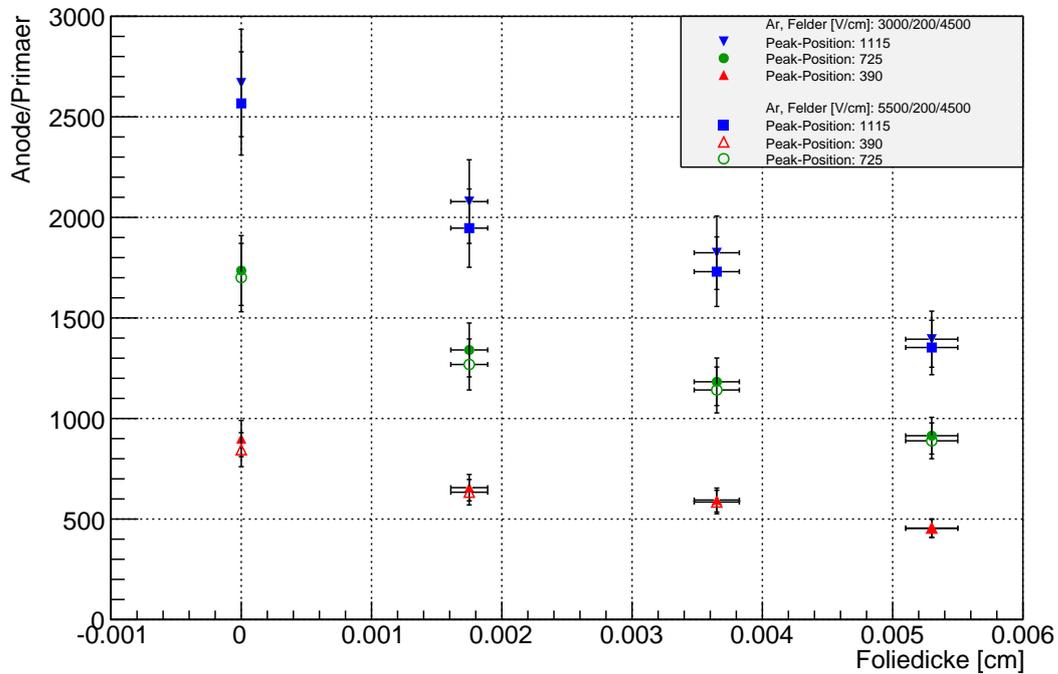


Abb. 8.7: Anode/Primär = Gas-Verstärkung Raten-Abhängig. [Eig13]

Den im letzten Abschnitt für den Absorptions-Koeffizienten bestimmten Wert von $-322,77 \frac{1}{cm}$ lässt sich auch in den Messungen der Ströme mit zusätzlicher GEM-Verstärkung wiederfinden. Abb. 8.4 und 8.5 jeweils die Kathoden und Anoden-Ströme in Abhängigkeit von der eingesetzten Aluminium-Folie.

Um die Verläufe der Ströme besser überprüfen zu können, bildet man das Verhältnis der Ströme pro entsprechender Primär-Ionisation. so erhält man Abb. 8.6 und 8.7.

An der Kathode, welche den Ionen-Strom aufnimmt, ist zwar auch ein leichtes Abfallen der Verhältnisse in Abb. 8.6 zu sehen, die Graphen bleiben sonst weitestgehend konstant.

Dieses Verhalten lässt sich in Abb. 8.7 nicht feststellen. Die Gas-Verstärkung liegt zu Beginn der Messung, sprich bei der Messreihe ohne Folie, bei etwas unter 1000, 2000 und 3000. Mit jeder zusätzlichen Absorber-Folie jedoch sinkt sie soweit ab, dass nach drei Folien jeder Wert auf die Hälfte des Ursprungswertes abgefallen ist.

8.2.2 Resultierender IB

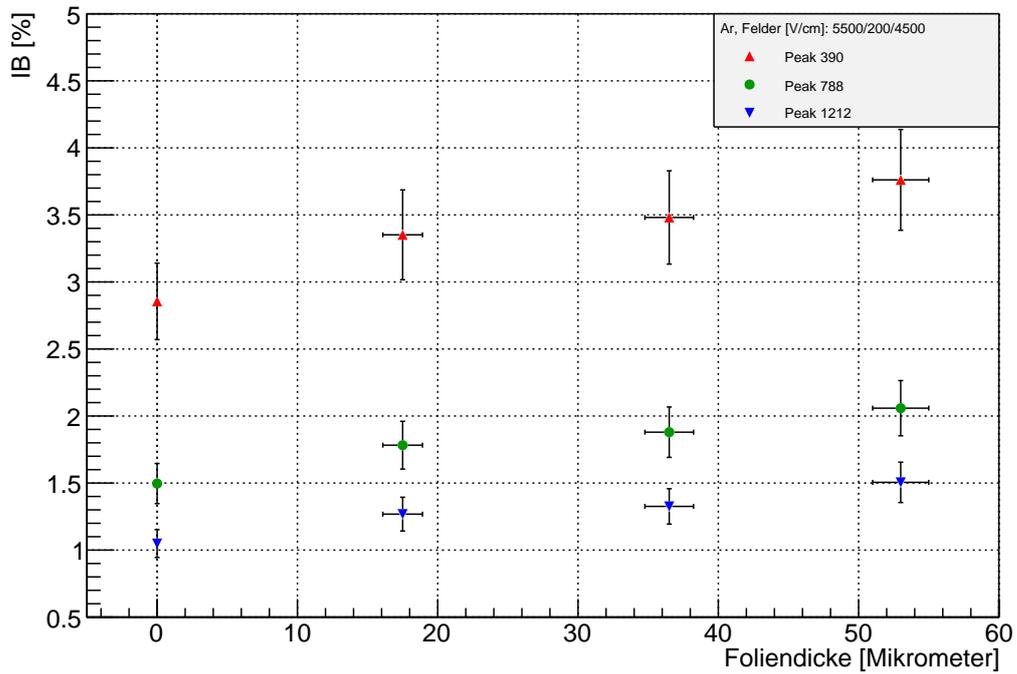


Abb. 8.8: IB für Felder $[\frac{V}{cm}]$: 5500/200/4500. [Eig14]

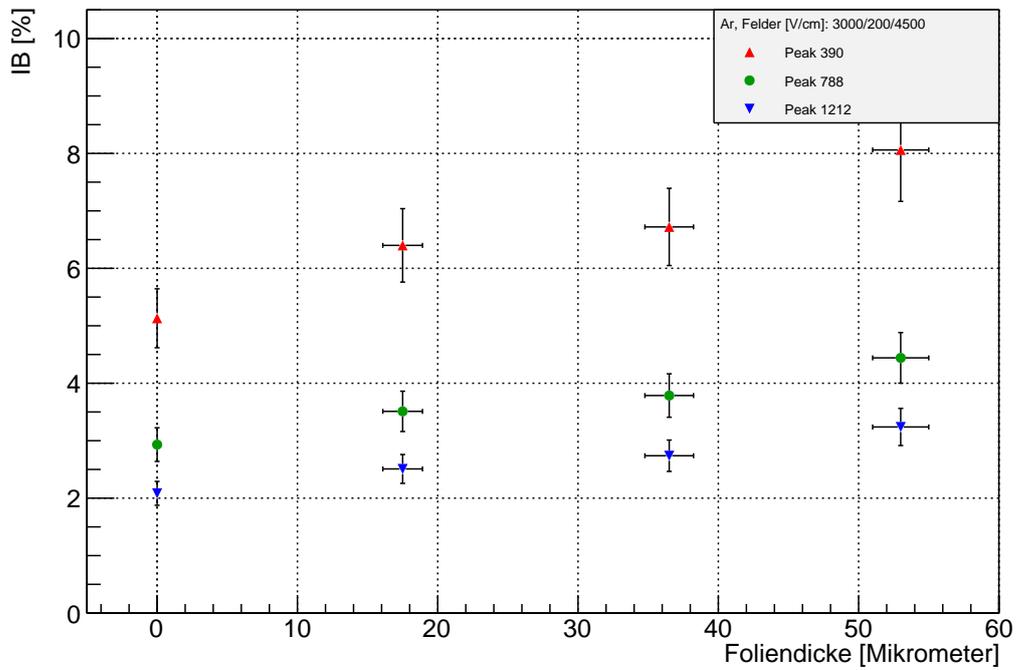


Abb. 8.9: IB für Felder $[\frac{V}{cm}]$: 3000/200/4500. [Eig15]

Abb. 8.8 und 8.9 zeigen die ersten Bestimmungen des IB abhängig von der Folien-Dicke.

Die Plots zeigen eine Abhängigkeit in Form eines ansteigenden IB mit der Folien-Dicke. Entsprechend fällt der IB mit höherer Rate.

Diese Erkenntnis ist nicht intuitiv. Durch das künstliche Herabsetzen der Rate senkt man die Primär-Ionisation im Drift-Volumen exponentiell herab, wie in Abb. 8.3 deutlich zu sehen war. Aber auf die Verhältnisse von Gas-Verstärkung und IB, sprich die durch die GEM-Folien erzeugten Effekte, sollte dies keinen sichtbaren Einfluss haben.

Dieses ernüchternde Ergebnis lässt sich mit dem in Abb. 8.7 beobachteten übermäßigen Absinken des Anoden-Stroms bei kleiner werdendes Rate erklären.

Um diese Messung zu verifizieren, wurde sie ein zweites Mal durchgeführt und in diesem Zuge zusätzlich mit einem NeCO_2N_2 -Gemisch verglichen, siehe Kapitel 8.4 (“Zweite Messung Ratenabhängigkeit“).

8.2.3 Analyse der Abweichung des Anodenstroms

Wie bereits erwähnt war die Messung der Ionen an der Kathode konsistent zu den Erwartungen, während die Messung der Elektronen an der Anode Fragen aufwirft. Entweder hat der Absorber einen tatsächlichen physikalischen Einfluss auf die Elektronen-Verstärkung oder -Messung, oder die Strom-Messung an der Kathode war von technischer Seite her fehlerhaft.

Die Raten-Abhängigkeit wäre physikalisch durch auftretende Raumladungs-Effekte zu erklären, die bei überhöhter Ionisation im Drift-Volumen entstehen könnten.

Um den Differenzen in den Anoden-Strömen zu den erwarteten Werten auf den Grund zu gehen, nahm ich mir Abb. 8.7 zur Grundlage und rechnete auf die Strom-Werte zurück, welche man für ein konstantes Verhältnis von Gas-Verstärkung zu Folie erwartet hätte.

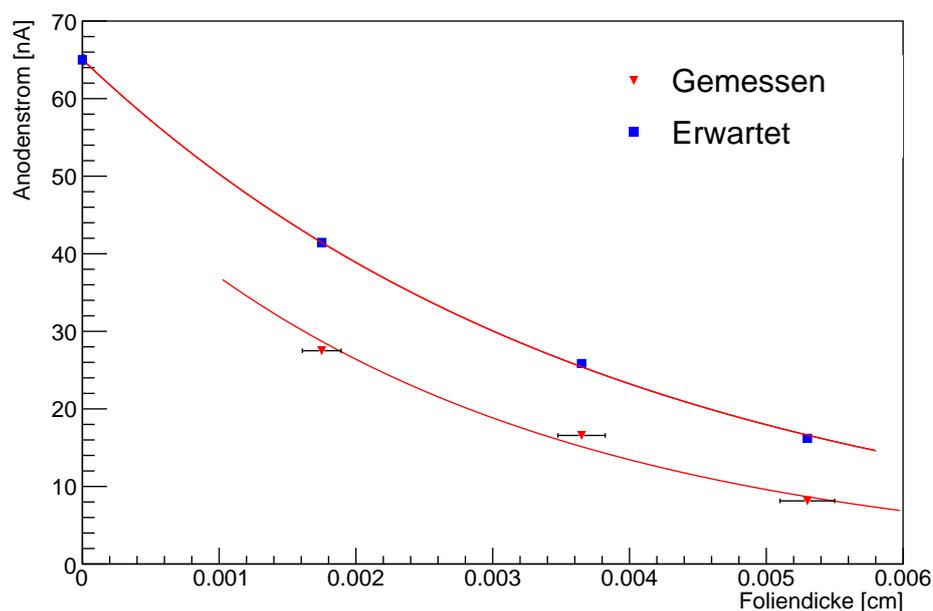


Abb. 8.10: Abweichung im Anoden-Strom. [Eig16]

Es ergibt sich Abb. 8.10. Die roten Dreiecke stellen die gemessenen Anoden-Ströme dar, die blauen Rechtecke die zu erwartenden Werte für eine konstanten Gas-Verstärkung. Hierbei muss man den ersten Punkt ohne Absorber außer Acht lassen, da aus diesem Anoden-Strom die festgesetzte Gas-Verstärkung bestimmt wurde, und dort deshalb nicht von der Erwartung abweichen kann.

Man erkennt, dass die gemessenen Werte systematisch unter den erwarteten liegen. Außerdem scheint es, als ob sich die gefitteten Exponentialfunktionen mit abnehmender Rate annähern.

Um die Konsistenz der entsprechenden pA-Meters der Firma Keithley zu überprüfen, wollte ich eine Vergleichsmessung von verschiedenen Strömen mit einem baugleichen zweiten Gerät in Reihen-Schaltung vornehmen. Die später durchgeführte Messung, zeigte jedoch keinen Unterschied der beiden Geräten.

8.3 Test auf Raumladung

Da die Möglichkeit, die Messungen ein zweites Mal durchzuführen einige Zeit nicht bestand, wurden in dieser Zeit Berechnungen zur Raumladung in der Kammer durchgeführt.

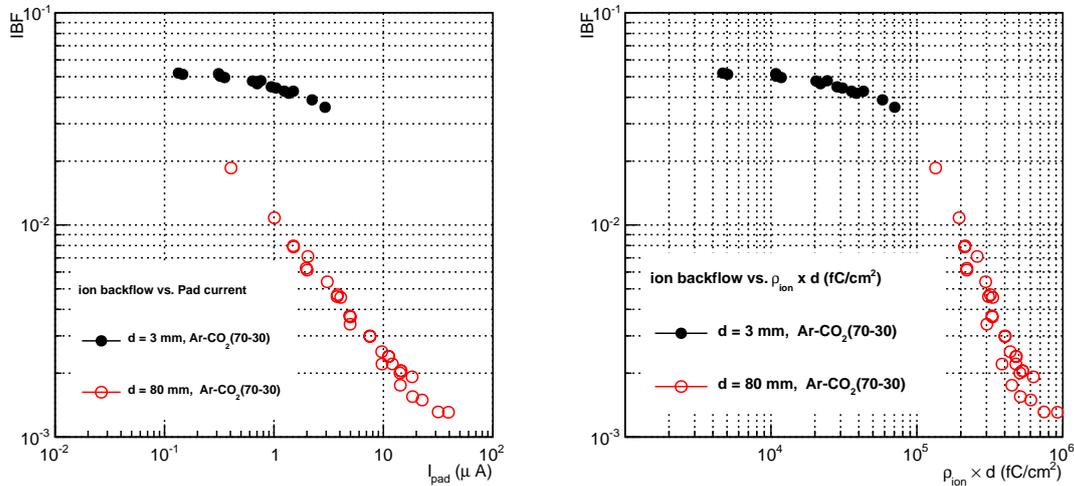


Abb. 8.11: links: IB gegen I_{Pad} ; rechts: IB gegen $\rho_{ion} \cdot d$. [Taku1]

Hierfür ist besonders der rechte Plot in Abb. 8.11 hilfreich. Er zeigt Messungen einer Gruppe aus Tokio, welche sich mit dem IB in Abhängigkeit von der Drift-Strecke $[d]$ und der Raumladungsdichte $[\rho_{ion}]$ beschäftigt.

Die Raumladungsdichte berechnet sich wie folgt:

$$\rho_{ion} = \frac{I_{Drift}}{A \cdot v_{Ion}}$$

Die Drift-Geschwindigkeit v_{Ion} ist eine Konstante und liegt für Argon-Gasmischungen bei $v_{Ion} = 600 \frac{cm}{s}$ und für Neon-Mischungen bei $v_{Ion} = 1600 \frac{cm}{s}$.

Weiterhin beschreibt A das Strahl-Profil, welches die auf Raumladung zu untersuchende Flächenstück A der bestrahlte Teil der ersten Hälfte des ersten Pads vor der Quelle. Diese Fläche konnte mittels technischer Zeichnungen über den Einstrahl-Winkel der Quelle und die Abmessungen der einzelnen Pads entsprechend bestimmt werden.

Am schwierigsten zu bestimmen ist der zu A zugehörige Ionen-Strom I_{Drift} , da sich die gemessenen Anoden-Ströme auf die festgelegten Pad-Flächen beziehen.

Um I_{Drift} genau zu bestimmen, kann man die Werte aus Abb. 8.1, dem Histogramm mit einzelne gemessenen Pad-Strömen, genauer untersuchen und daraus eine Funktion der Ladungsverteilung in Abhängigkeit von der Entfernung zur Fe-Quelle erstellen.

Wie bereits mehrmals erwähnt, verteilt die Quelle ihre Strahlung und damit auch die entstehende Ionisation kegelförmig. Diesen Effekt kann man zurückrechnen, indem man die Ströme auf der vertikalen Achse zu jeweils einem Gesamt-Strom aufaddiert.

Es ergibt sich:

Spalte 1	Spalte 2	Spalte 3	Spalte 4	Spalte 5
23,49	2,55	1,05	0,41	0,137

Tabelle 8.1: Summierte Pad-Ströme für Fe-Quelle in Argon-CO₂ in [nA]

Aus diesen Werten ergibt direkt sich folgender Plot:

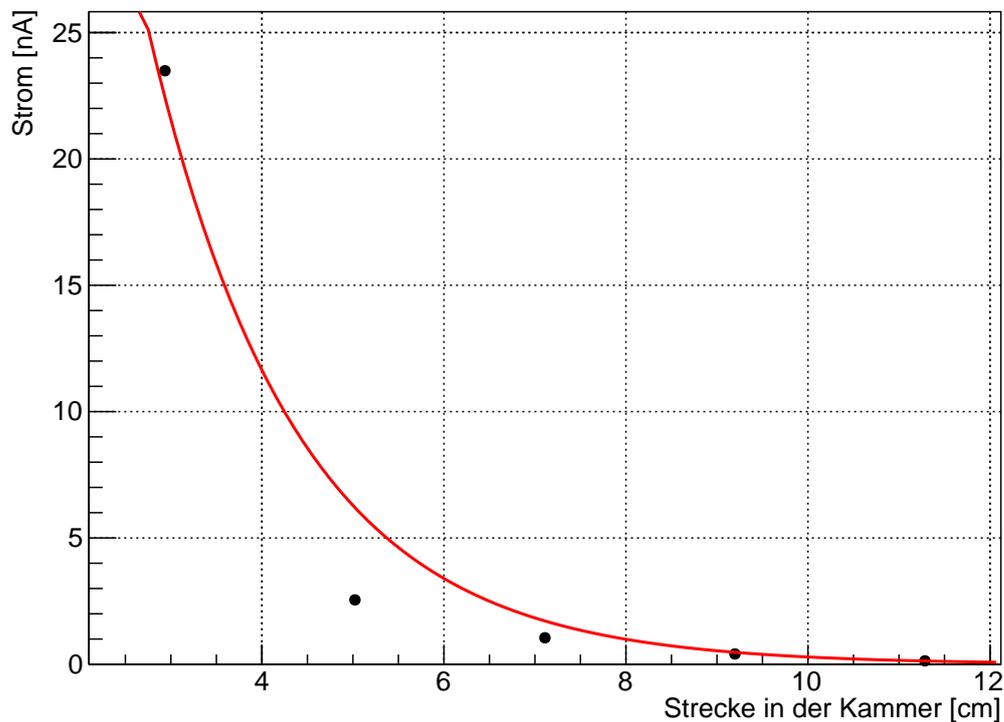


Abb. 8.12: Summierte Primär-Ströme der Pad-Reihen gegen Position in der Kammer vor Umbau der Quelle. [Eig17]

Eine Möglichkeit um die gewünschte Funktion zu erhalten, könnte nun darin bestehen, die Ströme in erster Näherung den Mittelpunkten zwischen Anfang und Ende der Pads zuzuordnen und dies anschließend exponentiell wie in 8.12 zu fitten.

Die zu plottenden Ströme stellen jedoch das Integral über die gesamten Pads dar und können daher nicht auf einzelne Punkte zusammengefasst werden.

Dementsprechend kann man pro Pad ein Integral der folgenden Form erstellen:

$$\int_{\text{Pad-Anfang}}^{\text{Pad-Ende}} [0] \cdot \exp([1] \cdot x) = \text{Summierter Pad-Strom}$$

Die Größen [0] und [1] sind hierbei die beiden unabhängigen Fit-Parameter der exponentiellen Funktion, welche es nun genauer zu bestimmen gilt.

Layout of the cell

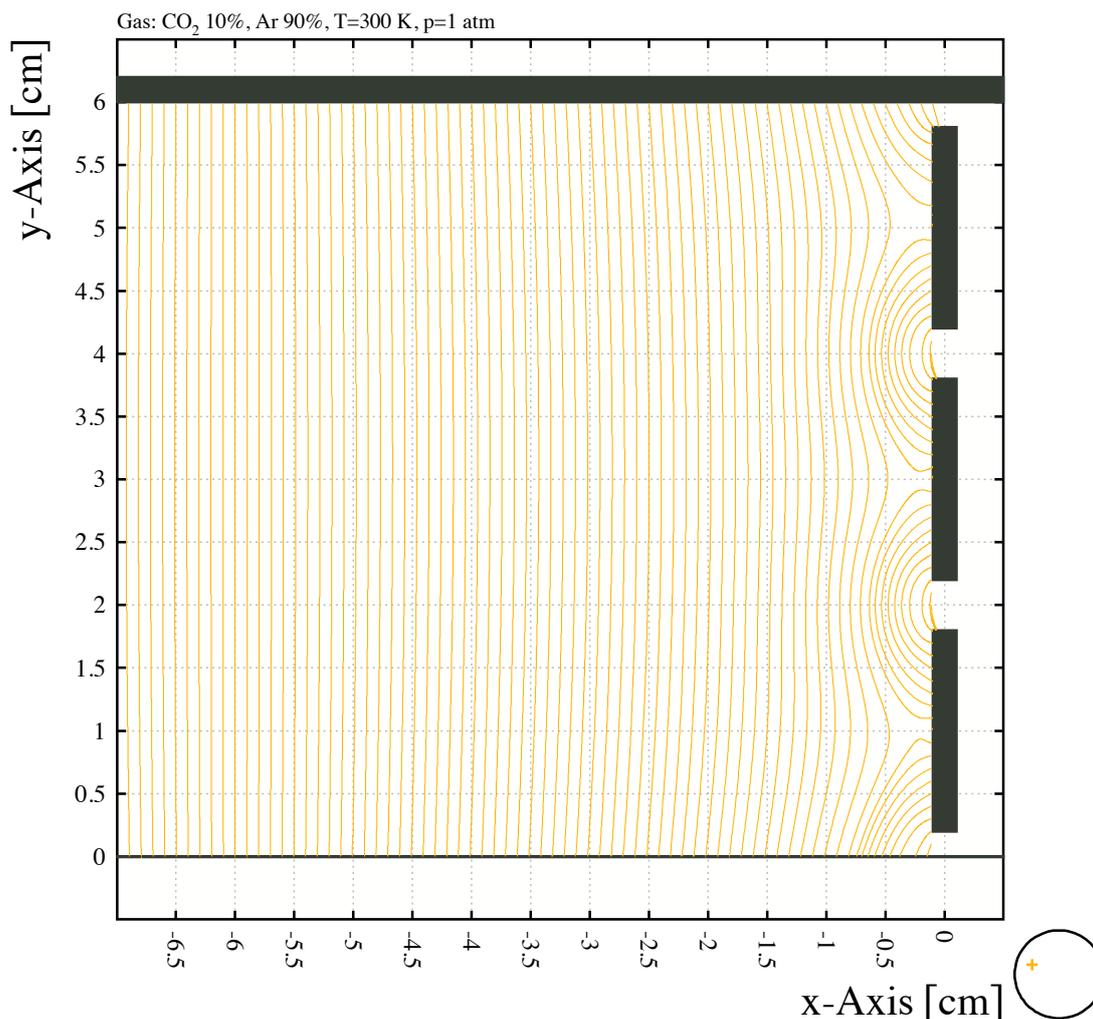


Abb. 8.13: Feld-Simulation für den Feldkäfig. [Ernst2]

Im Laufe dieser Berechnungen kommt auch die Feldgeometrie in der Kammer zum Tragen. Nach einer auf den Feldkäfig ausgerichteten Simulation, welche in Abb. 8.13 graphisch dargestellt wird, ergibt sich, dass erst in einem Abstand von 0,81 cm zum Mittelpunkt des Feldkäfigs Feldlinien vorhanden sind, welche Elektronen auf die Pads transportieren. Bei genauerer Betrachtung sammelt diese Linie bereits nach 0,5 cm die ausschließlich vor dem zweiten Streifen des Feldkäfigs entstandene Elektronen auf.

Dies bedeutet, dass in dem Zwischenbereich entstehende Elektronen vom Feldkäfig abgefangen und entsprechend nicht gemessen werden können. Die sensitive Fläche auf den äußeren Pads verkleinert sich entsprechend.

Integriert man dies in die Berechnung und wertet die fünf entstehenden Integrale aus, kann man die daraus entstanden Funktionen nach Parameter [0] umstellen und plotten. Es ergibt sich:

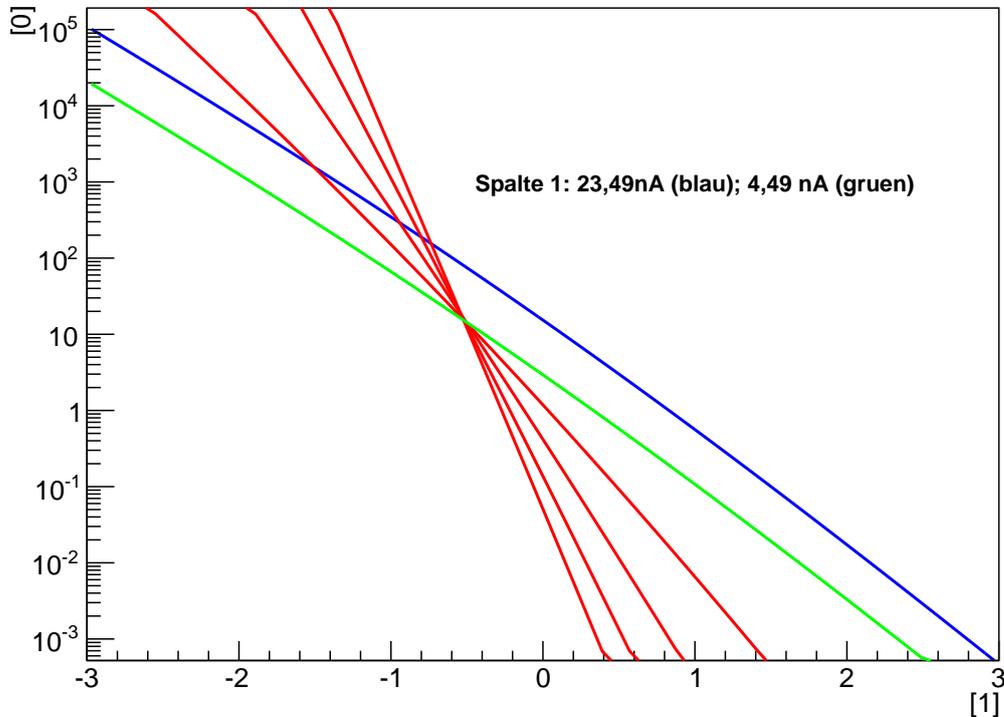


Abb. 8.14: Funktionen für Fit-Parameter der Exponentialfunktion. Reihe 2-5: rot, Reihe 1: blau, Gewünschtes Ergebnis Reihe 1: Grün. [Eig18]

Man erkennt gut, dass sich vier der Pads (rot) ein geeignetes Werte-Paar bei $[0]=15,23$ und $[1]=-0,52$ finden lässt. Es handelt sich hierbei um die Pad-Spalte 2 bis 5. Die Pad-Spalte 1 (blau) passt jedoch nicht in dieses Bild. Erst mit einem um 19 nA niedrigeren Strom, würden die Parameter übereinstimmen.

Nun stellt sich die Frage, warum der gemessene Strom auf Pad 1 um das nahezu das Fünffache größer ist als erwartet.

Auf Grundlage des zuvor errechneten Werte-Paares ergibt sich für die Ladungsverteilung:

$$\int_{\text{Pad-Anfang}}^{\text{Pad-Ende}} 15,23 \cdot \exp(-0,52 \cdot x) = \text{Summierter Pad-Strom}$$

Für die erste Hälfte des ersten Pads ergibt sich daraus $I_{\text{Drift}} = 2,43$ nA. Daraus wiederum lässt sich die Größe Ionendichte mal Drift-Länge ($\rho_{\text{ion}} \cdot d$) berechnen.

Mit einem errechneten Wert für $\rho_{\text{ion}} \cdot d$ von $2 \cdot 10^4$ [fC/cm²] folgt nach Abb. 8.11, dass der IB sich nur geringfügig um eine halbe Größenordnung ändert.

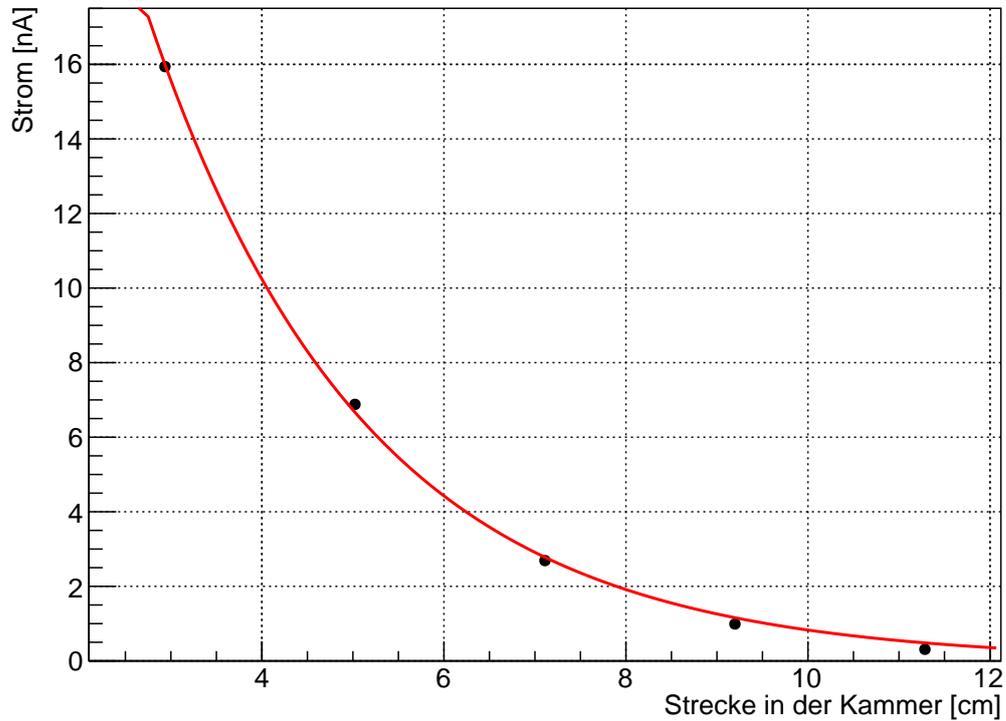


Abb. 8.15: Summierte Primär-Ströme der Pad-Reihen gegen Position in der Kammer nach Umbau der Quelle. [Eig19]

In Abb. 8.15 sieht man die Ionisation in der Kammer nach dem Umbau der Fe-Quelle. Die Verteilung ist nun homogener im Vergleich zu Abb. 8.12 und die Parameter der Exponentialfunktion lassen sich besser bestimmen.

Aus:

$$\int_{\text{Pad-Anfang}}^{\text{Pad-Ende}} 16.692 \cdot \exp(-0.432073 \cdot x) = \text{Summierter Pad-Strom}$$

ergibt sich $I_{\text{Drift}} = 5,57$ nA.

Dies führt zu $\rho_{\text{ion}} \cdot d = 3,7 \cdot 10^4$ [fC/cm²], wodurch eine Änderung des IB bis zu 20% in Abb. 8.11 errechnet wird.

8.4 Zweite Messung Ratenabhängigkeit

Um Ergebnisse der ersten ratenabhängigen Messungen zu verifizieren, wurde sie in einem erweiterten Rate-Bereich und mit zwei verschiedenen Gasen nachgemessen. Gemessen wurde zuerst in ArCO_2 (90/10) wie zuvor. Danach wurde in der Gas Mischung NeCO_2N_2 (90/10/5) gemessen.

Erzeugt wird die Neon-Mischung, indem man einem NeCO_2 (90/10) Gemisch nachträglich 5% N_2 hinzu mischt. Tatsächlich ergibt sich eine Mischung im Verhältnis (85,5/9,5/5). Der Einfachheit halber nennt man sie NeCO_2N_2 (90/10/5). Die GEM-Kombination in dieser Messung bestand aus 4 GEMs (Standart-GEM; Large-Pitch-GEM; Large-Pitch-GEM; Standart-GEM).

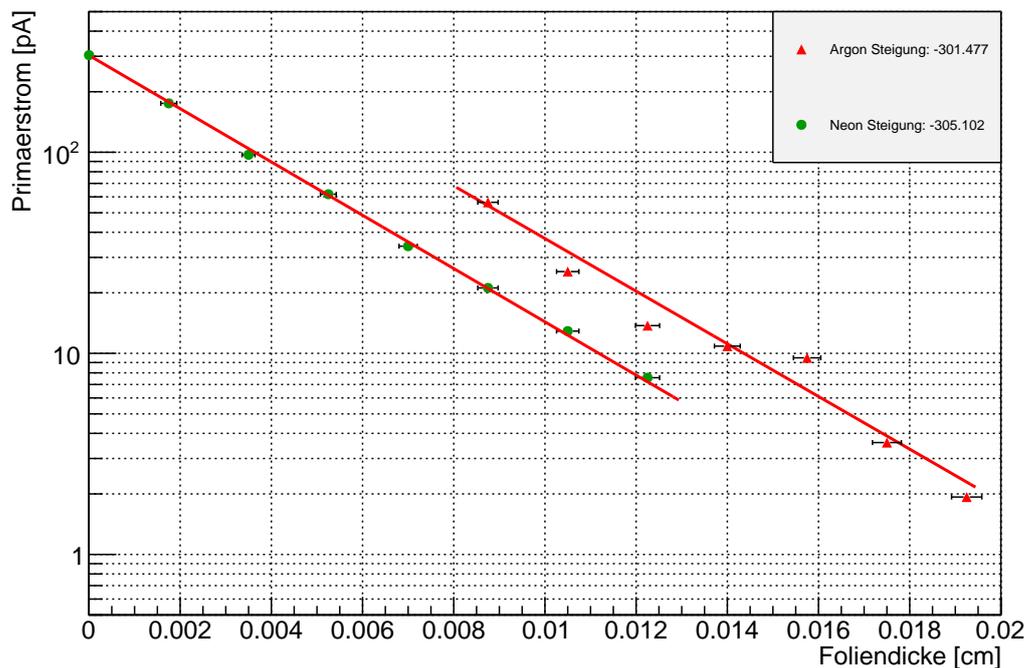
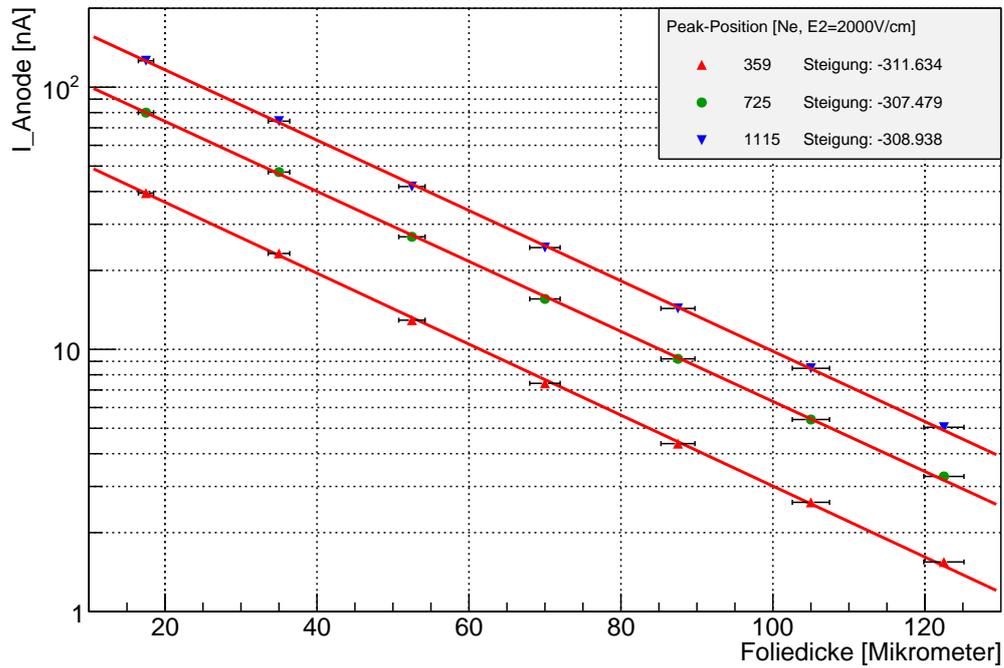


Abb. 8.16: Logarithmische Darstellung der Primär-Ströme von Argon und Neon. [Eig20]

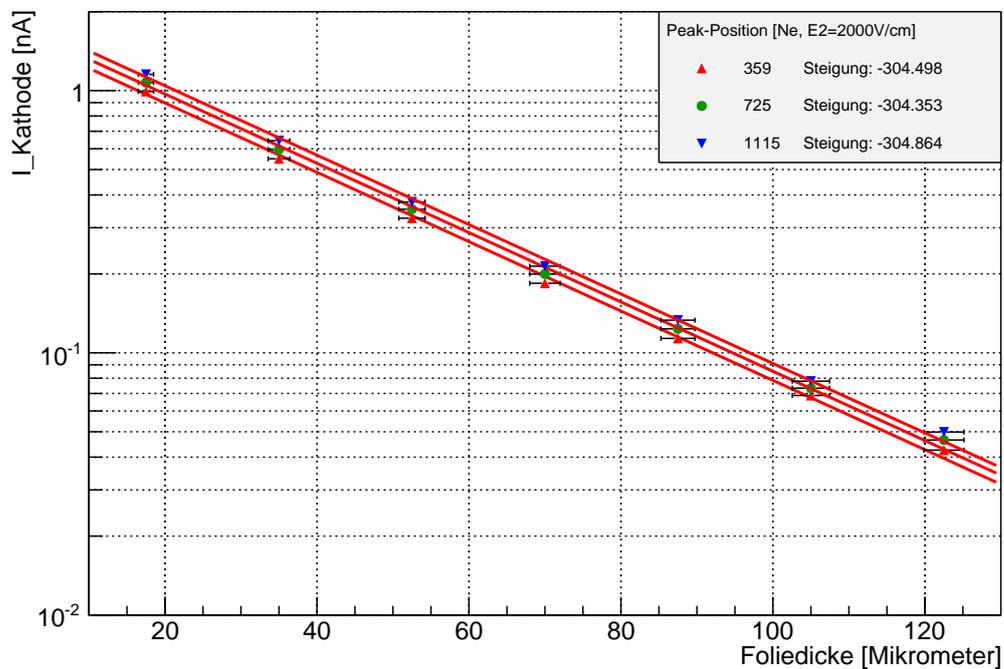
In Abb. 8.16 überblickt man den gesamten Bereich der Messung und die Ströme der Primär-Ionisation in Abhängigkeit der 0 bis 11 Aluminium-Folie. Die Messreihen der beiden Mischungen liegen zwar versetzt zueinander im Plot, liefern jedoch zu dem aus Abb. 8.2 bekannten Absorptions-Koeffizienten von 332,397 [1/cm] vergleichbare Werte in ihrer Steigung. Eine wichtige Erkenntnis ist, dass Ströme unterhalb von 10 pA über dem Fit liegen.

Hier kommt ein Effekt der Strommessung an der Kathode zum Tragen. Es ist zu beobachten, dass im vorliegenden Messaufbau für die Messung schwacher Ströme an der Kathode große Zeitintervalle nötig werden, da der Strom-Wert asymptotisch gegen seinen Absolut-Wert wandert. Je kleiner der zu messende Strom-Wert wurde, desto größer wurde das Zeitintervall bis der Strom sich auf einen Wert einpendelte. Zurückgeführt wird dies auf Umlade-Effekte in den Kabeln, welche mit abnehmendem Strom größere Zeit in Anspruch nehmen.

8.4.1 Messung in der Neon-Mischung

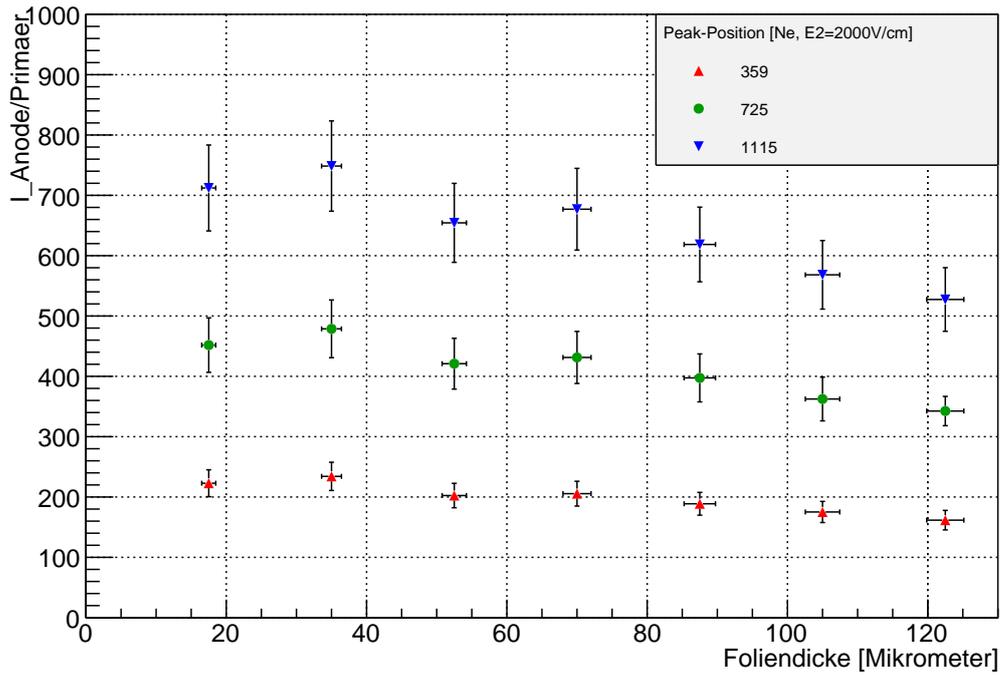


(a) Anoden-Ströme in der Neon-Mischung.

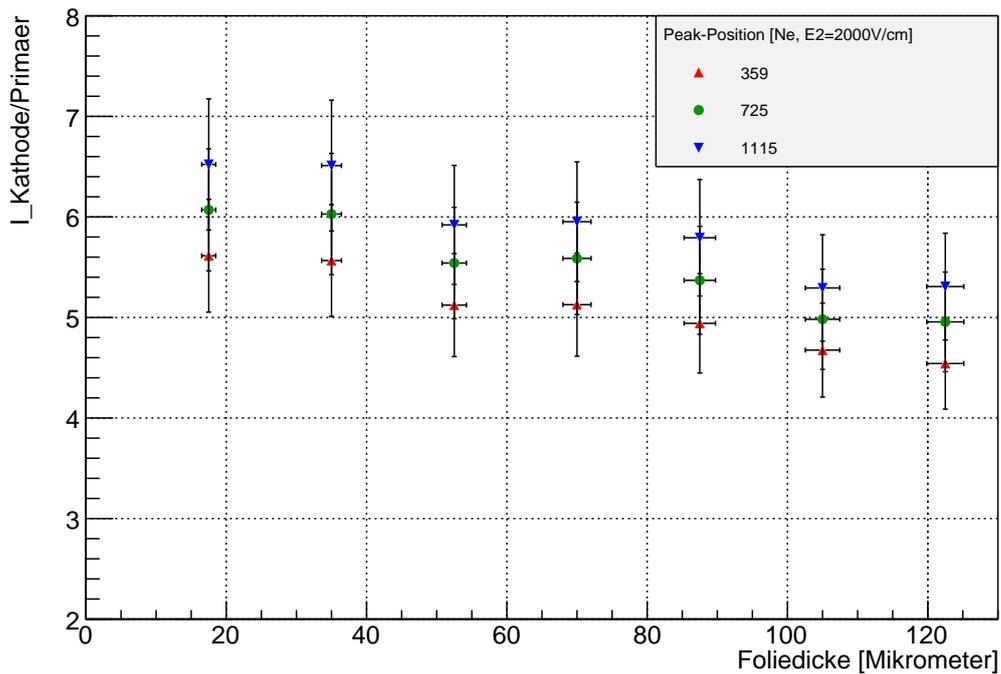


(b) Kathoden-Ströme in der Neon-Mischung.

Abb. 8.17: Logarithmische Darstellung der Anoden- und Kathoden-Strom abhängig von der Absorber-Dicke in Neon. [Eig21+22]



(a) Anoden/Primär-Ströme = Gas-Verstärkung in der Neon-Mischung.



(b) Kathoden/Primär-Ströme in der Neon-Mischung.

Abb. 8.18: Darstellung der Verhältnisse Anoden-/Primär- und Kathoden-/Primär-Strom abhängig von der Absorber-Dicke in Neon. [Eig23+24]

An den beiden Plots der Ströme an Anode und Kathode aus der Messung in der Neon-Mischung in Abb. 8.17 erkennt man, dass sie in ihren Steigungen bis auf eine Abweichung von einem Prozent sehr nahe am Wert aus Abb. 8.2 liegen. Lediglich in der in Abb. 8.17 (b), der Messung der Kathoden-Ströme, fallen die bekannten Abweichungen bei niedrigen Strömen auf.

Die Ströme sollten, wie bereits in der Analyse der ersten Messung erwähnt, direkt proportional zur entsprechenden Primär-Ionisation sein. Deshalb erwartet man in den Plots von Strom/Primär-Strom in Abhängigkeit von der Absorber-Dicke horizontal verlaufende Linien.

In beiden Plots der Abb. 8.18 ist dies bis auf ein systematisches Absinken bei niedrigen Raten zu beobachten, welches knapp nicht mit den Fehler zu erklären ist.

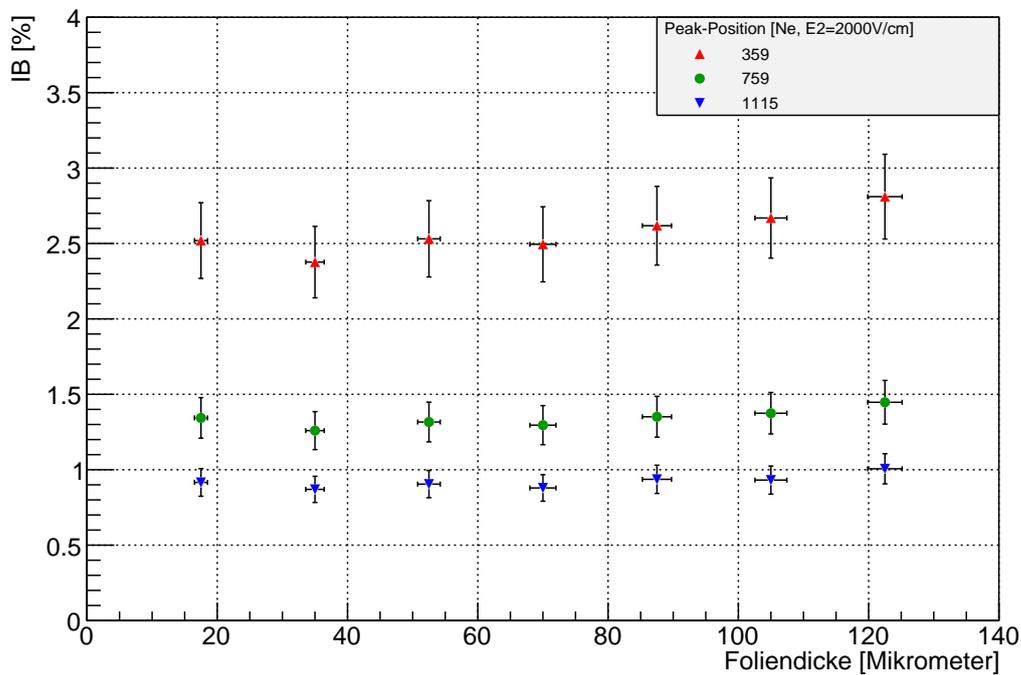
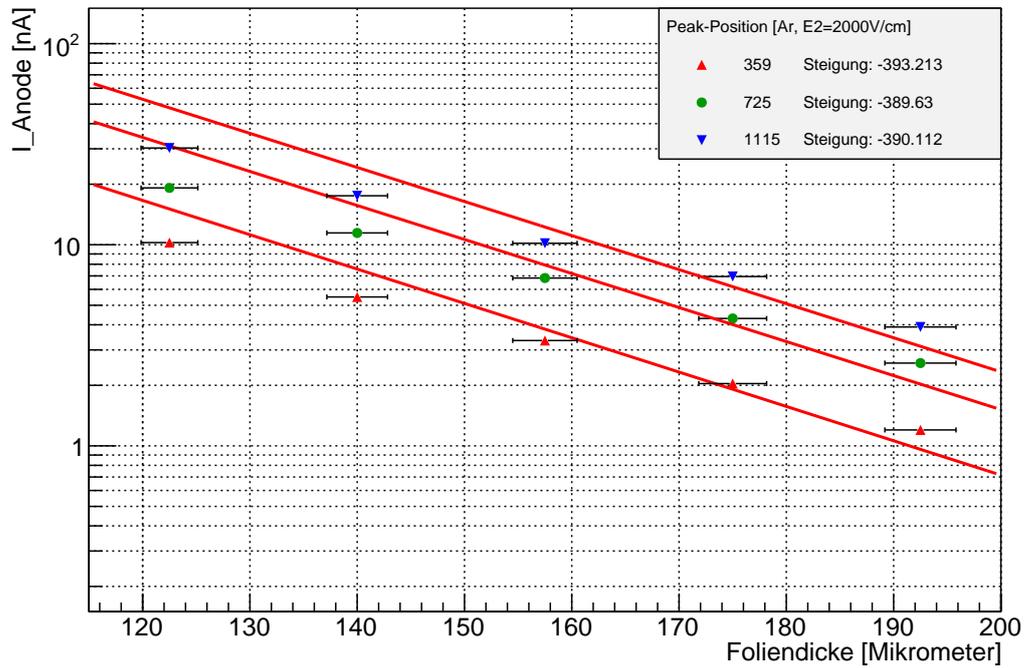


Abb. 8.19: IB der Neon-Mischung bei $E_{T_{trans2}} = 2000 \text{ V/cm}$. [Eig25]

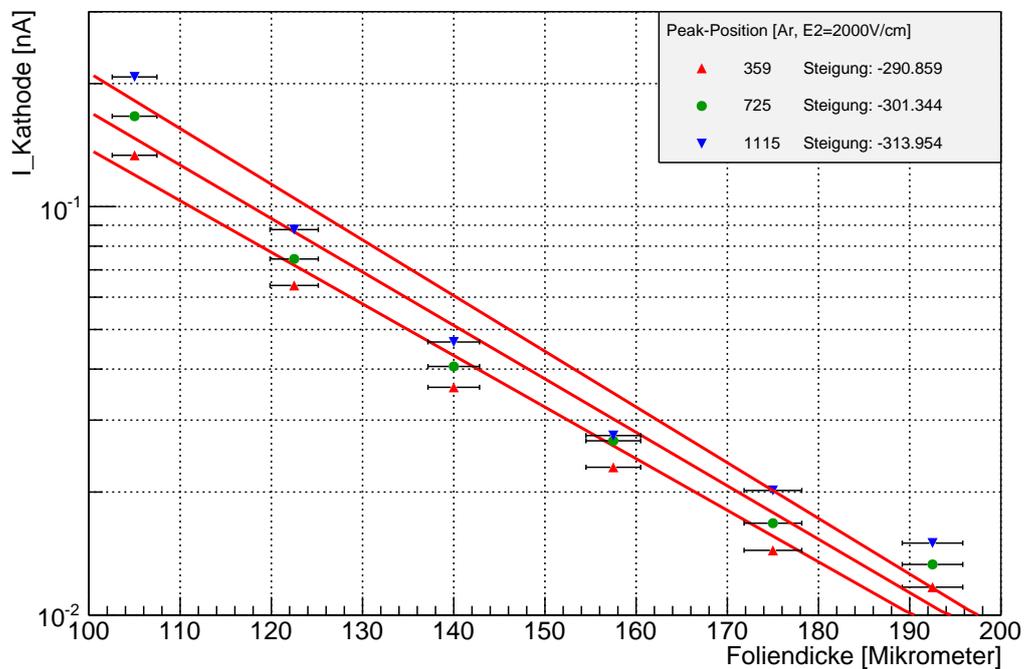
Entsprechend der zueinander konsistenten Verläufe in Abb. 8.17, bleibt der errechnete IB in Abb. 8.19 über die gesamte Breite des Plot nahezu konstant.

Somit kann man festhalten, dass der IB innerhalb der Fehler in Neon nicht raten-abhängig ist.

8.4.2 Messung in der Argon-Mischung

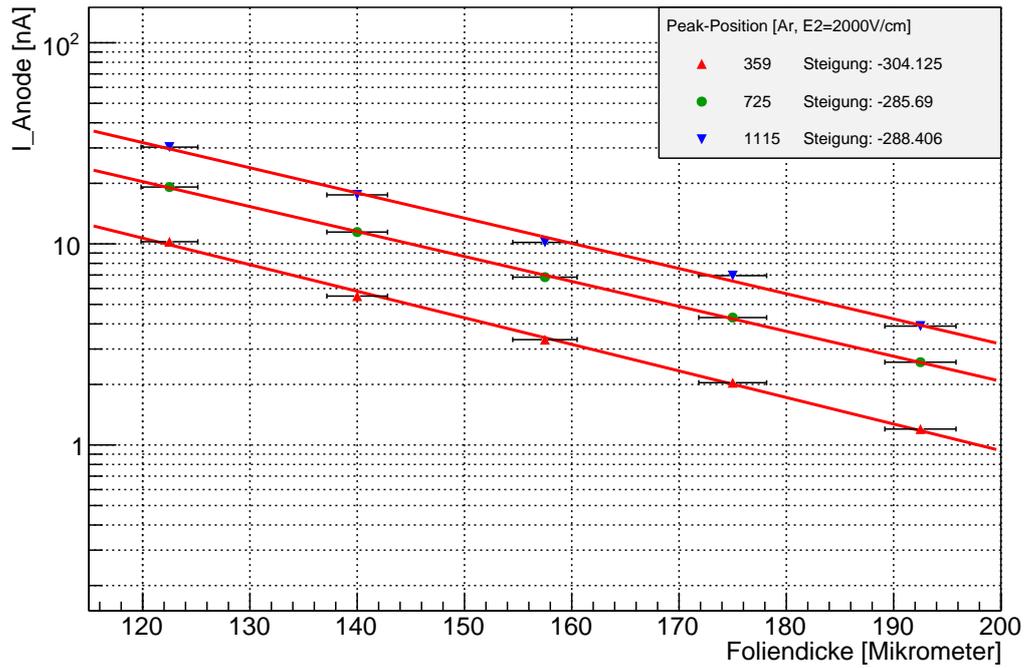


(a) Anoden-Ström in der Argon-Mischung.

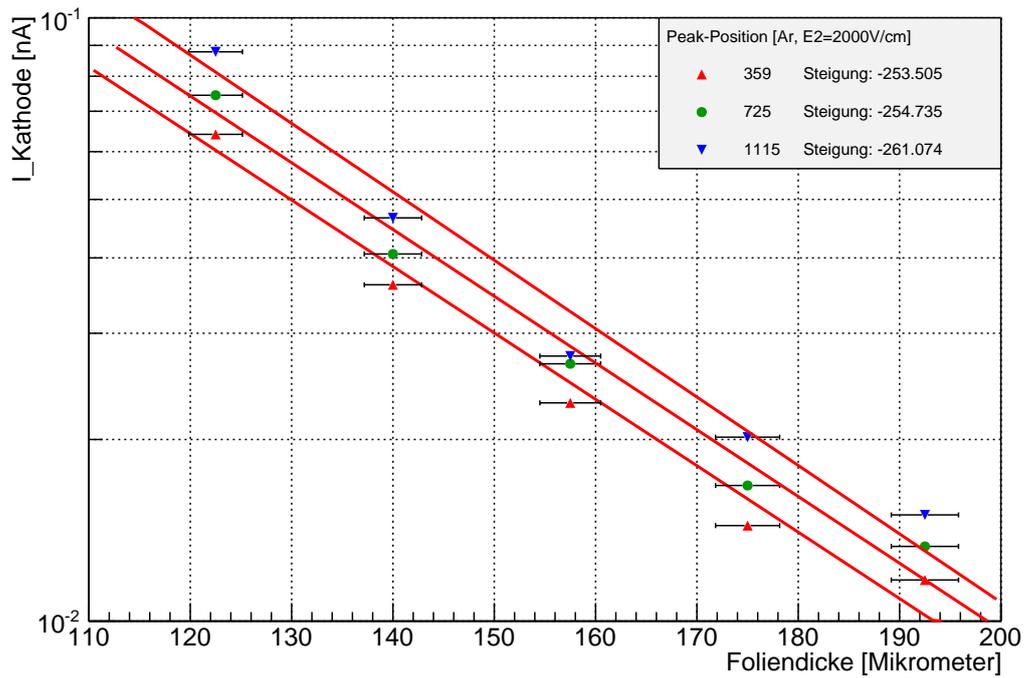


(b) Kathoden-Ström in der Argon-Mischung. (Nach Abzug 1.9 pA Offset)

Abb. 8.20: Logarithmische Darstellung der Anoden- und Kathoden-Strömen abhängig von der Absorber-Dicke in Argon. [Eig26+27]



(a) Anoden-Strom in der Argon-Mischung ohne 1. Punkt.



(b) Kathoden-Strom in der Argon-Mischung ohne 1. Punkt.

Abb. 8.21: Logarithmische Darstellung von Anoden- und Kathodenströmen ohne ersten Messpunkt bei höchster Rate. [Eig28+29]

Aus der Auswertung der Messdaten der Argon-Mischung entstanden die Plots in Abb. 8.20. Man erkennt sofort, dass die linearen Fit-Funktionen nicht so gut zu den Messwerten passen wie zuvor in der Neon-Messung. Führt man den Fit hingegen ohne den ersten Messpunkt bei $105 \mu\text{m}$ aus, so ergibt sich Abb. 8.21, welche von den Werten konsistenter sind.

Zusätzlich ist bei niedrigen Kathoden-Strömen unter 10 pA der bereits erwähnte Abweichung zu beobachten.

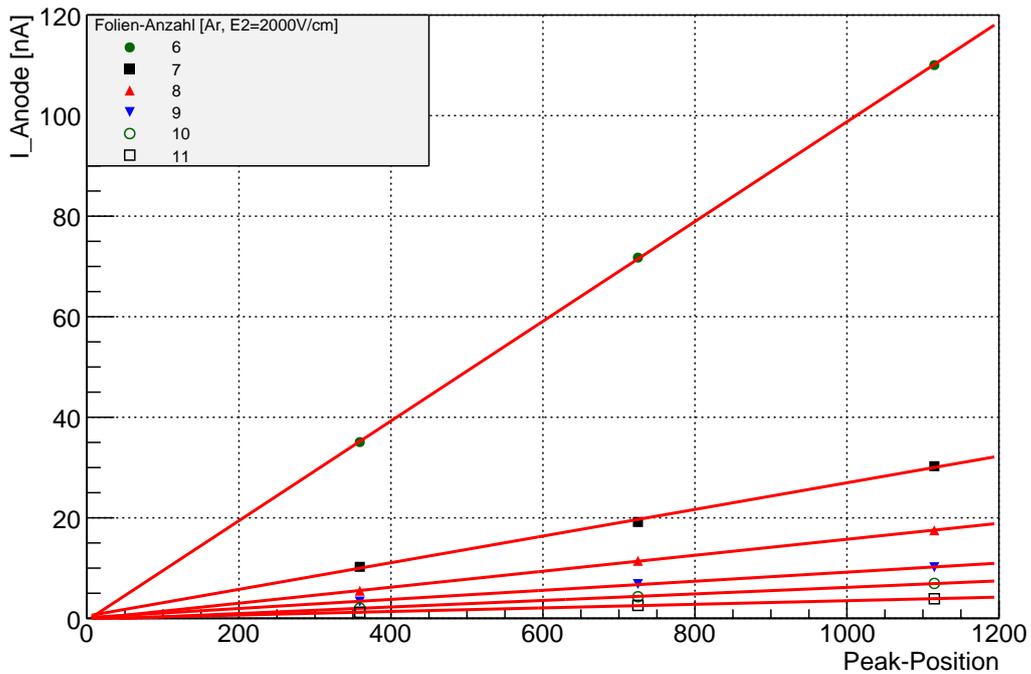
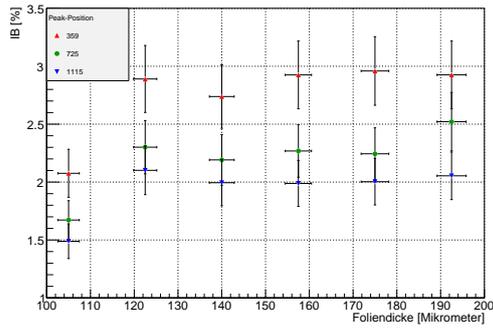
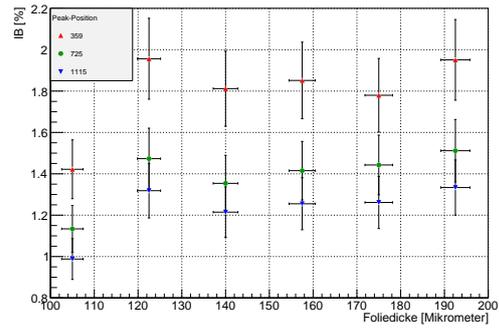


Abb. 8.22: Darstellung des Anodenstroms gegen die Peak-Position. Die Anzahl der Folien nimmt von oben nach unten zu. [Eig30]

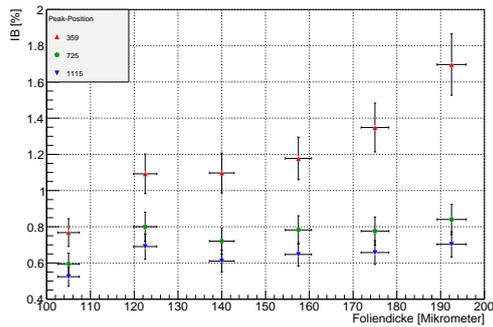
Um die Konsistenz der Verhältnisse von Anoden-Strom zu Peak-Position zu überprüfen wurde Abb. 8.22 angefertigt. Es ist gut ersichtlich, dass sich bei den verschiedenen Absorber-Dicken Anoden-Strom und Peak-Position immer linear zueinander verhalten.



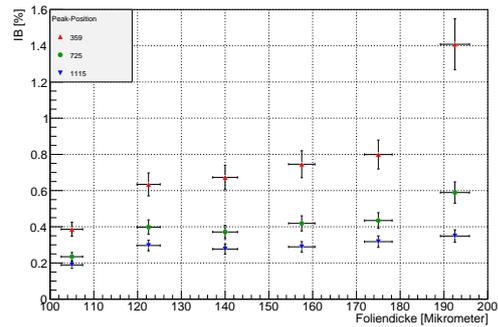
(a) IB für $E_{Trans_2} = 200$ V/cm.



(b) IB für $E_{Trans_2} = 500$ V/cm.



(c) IB für $E_{Trans_2} = 1000$ V/cm.



(d) IB für $E_{Trans_2} = 2000$ V/cm.

Abb. 8.23: Darstellung der IB für vier verschiedene Einstellungen des E_{Trans_2} . [Eig31-34]

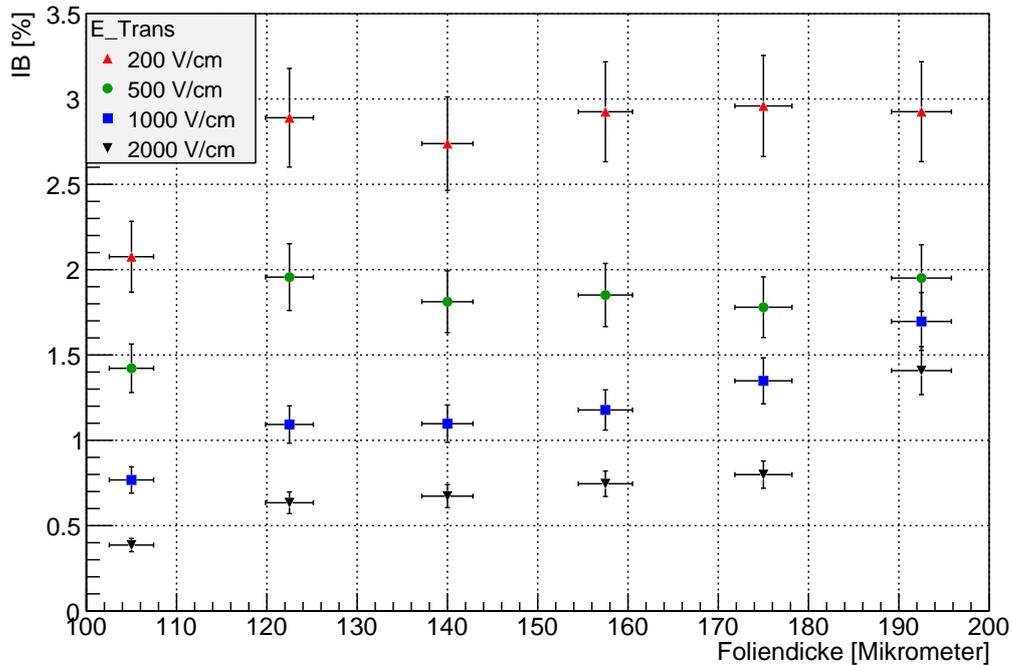


Abb. 8.24: IB für vier verschiedene E_{Trans_2} bei Peak-Position 359 im Vergleich. [Eig35]

Betrachtet man die vier Plots der Abb. 8.23 auf der vorherigen Seite, erkennt man bei ansteigendem E_{Trans_2} vor allem eine Absenkung des IB. Aber auch ein verhältnismäßigen Anstieg bei hohen Raten wird sichtbar. Deutlicher wird dies in Abb. 8.24. Für höhere Werte von E_{Trans_2} wird der IB generell kleiner, der Effekt bei niedrigen Raten wird hingegen ausgeprägter.

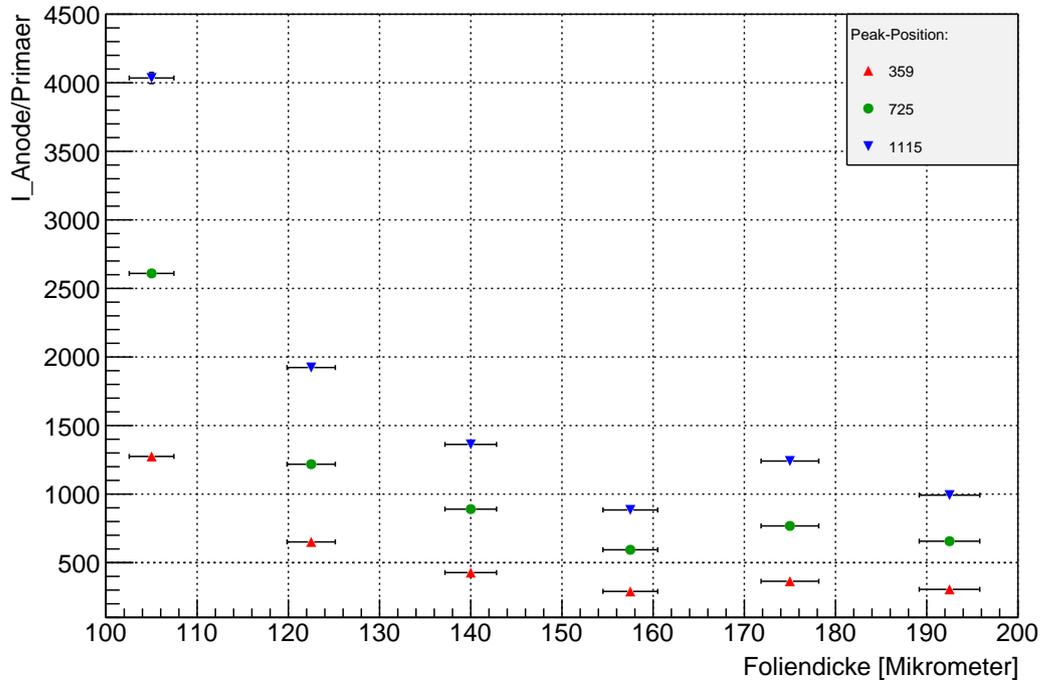


Abb. 8.25: Anoden-/Primär-Strom = Gas-Verstärkung im Argon-Gemisch. [Eig36]

Abb. 8.25 zeigt den Gain in dieser Messung im Argon-Gemisch. Wie bereits in der ersten Messreihe mit Argon, siehe Abb. 8.7, ist ein deutliches Absinken bei kleiner werdenden Rate zu beobachten. Das Schwanken in den letzten drei Punkten ist mit dem in Abb. 8.16 gezeigten Schwanken im Primär-Strom zu erklären.

8.4.3 Abhängigkeiten vom Gas-Einfluss in die Kammer

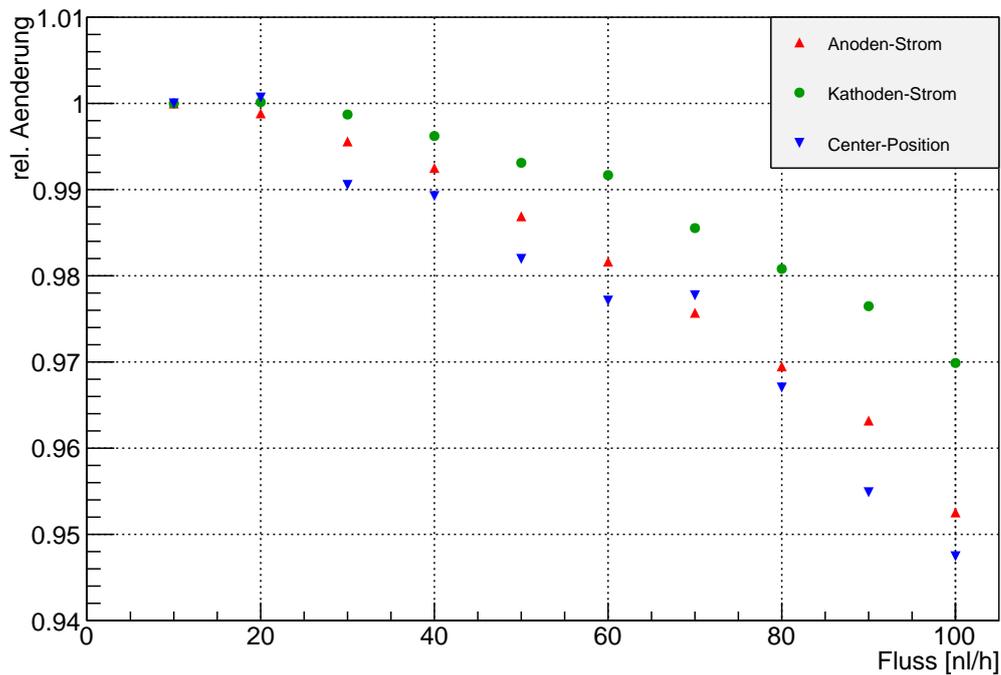


Abb. 8.26: Relative Änderung der relevanten Messgrößen in Abhängigkeit vom Gas-Fluss. [Eig37]

Da der Gas-Einfluss bei dem vorliegenden Experiment eine schwankende Größe war, ist eine Analyse der Abhängigkeit von den Messgrößen zum Gas-Fluss durch die Kammer eine interessante Messung. Zwar konnte der Fluss über ein Gas-Fluss-Regler eingestellt werden, dieser hängt jedoch direkt an dem Vordruck aus der Leitung bzw. der Gas-Flasche.

In Abb. 8.26 wird die relative Änderung der Anoden- und Kathoden-Ströme sowie der Peak-Position zu ihrem ursprünglichen Wert für steigenden Gas-Fluss gezeigt. Nachdem der Druck zuvor auf 40 kPa festgelegt wurde, konnte der Fluss am Fluss-Regler variiert werden.

Auch wenn die Werte bei größerem Fluss absinken und sich das Ratio zwischen Anoden- und Kathoden-Strom sogar vergrößert, sind die Änderungen lediglich im 3-5 %-Bereich und somit vernachlässigbar klein.

Mögliche Erklärungen des beobachteten Effekts sind Auswirkungen des durch den hohen Fluss erhöhten Innendrucks der Kammer.

9 Zusammenfassung und Fazit

Zunächst sind einige Methoden und Techniken zusammenfassend aufzuzählen, welche mir in meiner Zeit am IKF nahegebracht wurden.

Von technischer Seite her sind hier der Umgang mit der Instituts-eigenen Lichtmikroskop und den pA-Messgeräten sowie der analogen Messkette zu nennen. Außerdem gegebenen GEM-Folien auf Fehlstellen zu untersuchen, sie unter Spannung zu testen und anschließen in die Testkammer zu montieren und diese anschließend ordnungsgemäß in Betrieb zu nehmen.

Während des Betriebs der Kammer sind neben den Messungen selbst auch die Programmierung in C++ um ein vorhandenes GUI zu verstehen und erweitern zu können zu nennen.

In der Analyse der gewonnenen Daten ist vor allem die im Institut verbreiteten Analyse-Software „Root“ zu nennen um Daten zu verarbeiten, zu plotten und zu fitten.

Der physikalische Gehalt der Messungen war in Folge der ersten Messung nicht mit Sicherheit zu bestimmen, da die Raten-Abhängigkeit des IB entweder grundlegender physikalischer oder technischer Natur sein konnte, was näher zu untersuchen blieb. Nach wiederholter Messung mit größerem Messbereich und einer zweiten Messreihe mit einer anderen Gas-Mischung konnten jedoch Aussagen getroffen werden.

So konnte in der Argon-Messung die gleiche Raten-Abhängigkeit des IBF wie zuvor festgestellt werden, während der IBF in der Neon-Mischung kaum merklich anstieg. Außerdem ist festzuhalten, dass Messungen an der Kathode nur über 10 pA problemlos genau sind. Darunter werden die Werte bei zu wenig Messzeit weniger aussagekräftig.

10 Abkürzungsverzeichnis

ADC	Analog to Digital Converter
ALICE	A Large Ion Collider Experiment
ALTRO	ALICE TPC ReadOut chip
CBM	Compressed Baryonic Matter
CERN	Conseil Européen pour la Recherche Nucléaire
EMCal	ElectroMagnetic Calorimeter
FAIR	Facility for Antiproton and Ion Research
GEM	Gas Electron Multipliers
GUI	Graphical User Interface
HMPID	High Momentum Particle Identification Detector
IB	Ion Back-flow
IKF	Institut für Kernphysik Frankfurt
ITS	Inner Tracking System
IROC	Inner ReadOut Chamber
LBL	Lawrence Berkeley Laboratory
LEP	Large Electron-Positron Collider
LHC	Large Hadron Collider
MRPC	Multi-gap Resistive Plate Chamber
MWPC	Multi-Wire Proportional Chamber
NIST	National Institute of Standards and Technology
OROC	Outer ReadOut Chamber
PHOS	PHOton Spectrometer
QGP	Quark-Gluon-Plasma
RICH	Ring Imaging Cherenkov-Detektor
SLAC	Stanford Linear Accelerator Center
SM	Standardmodell
TDR	Technical Design Report
TOF	Time Of Flight
TPC	Time Projection Chamber
TRD	Transition Radiation Detector

11 Literaturverzeichnis

- [ALICE00] ALICE Collaboration. *Technical Design Report of the Time Projection Chamber*. LHCC 2000–001, 2000
- [Blum08] W. Blum, W. Riegler und L. Rolandi. *Particle Detection with Drift Chambers*. Springer-Verlag, 2008
- [Buz00] A. Buzulutskov, A. Breskin, R. Chechik, G. Garty, F. Sauli, L. Shekhtman. *The GEM photomultiplier operated with noble gas mixtures*. NIM A 443 (2000) 164-180, 2000
- [CERN09] CERN Collaboration *The CERN Large Hadron Collider: Accelerator and Experiments*. Volume 1, Genf, 2009
- [Buz02] A. Buzulutskov. *Physics of multi-GEM structures*. E-print physics/0206082, 2002
- [Fab10] L. Fabbietti for the GEM-TPC Collaboration
The PANDA GEM-based TPC Prototype. arXiv:1004.4079v2, 2010
- [Iseg13] iseg Spezialelektronik GmbH
Bautzner Landstrasse 23 in 01454 Radeberg, Deutschland
- [Kai13] David Kaiser *Private Kommunikation*.
Damals TUM München, jetzt Helmholtz-Institut für Strahlen- und Kernphysik,
Universität Bonn
- [Keith13] Tektronix GmbH, Keithley Instruments
Landsberger Strasse 65 in 82110 Germering, Deutschland
- [Kra12] F.Kramer, R.Renfordt, M. Mitrovski.
Versuch 22: Funktionsweise einer Spurendriftkammer.
Versuchsanleitung aus dem Fortgeschrittenen-Praktikum des
FB Physik der Universität Frankfurt am Main, 2012
- [Lya06] A. V. Lyashenko, A. Breskin, R. Chechik, J. F. C. A. Veloso, J. M. F. Dos Santos,
und F. D. Amaro. *Advances in ion back-flow reduction in cascaded
gaseous electron multipliers incorporating R-MHSPelements*.
arXiv:physics/0607015v1, 2006
- [NIST13] National Institute of Standards and Technology
100 Bureau Drive, Stop 1070, Gaithersburg, Maryland

- [Pin08] S. Duarte Pintoa R. Jonesa , L. Ropelewskia , J. Spanggaard and G. Tranquillea *GEM-based beam profile monitors for the antiproton decelerator*. arXiv:1111.3394v1, 2011
- [Sau97] F. Sauli, A. Sharma. *Gas Electron Multiplier*. NIM A386 531 1997, 1997
- [Schrei13] Private Kommunikation mit Stefan Schreiber aus der Elektronik-Abteilung des IKF.

12 Abbildungsnachweis

Titelseite:

Logo Goethe-Universität:

<http://www.muk.uni-frankfurt.de/34792965/Logo>

Logo IKF:

www2.uni-frankfurt.de/45142431/IKF-Logokl.jpg

Logo ALICE:

alicematters.web.cern.ch/sites/alicematters.web.cern.ch/files/images/newlogo2.jpg

Abbildungen innerhalb meiner Arbeit:

2. Physikalische Grundlagen:

[Wik13] commons.wikimedia.org/wiki/File:Standard_Model_of_Elementary_Particles-de.svg

[Wien13] hep.itp.tuwien.ac.at/ipp/imagesphysics01/QGM.jpg

[GSI13] theory.gsi.de/friman/trento_06/phasendiagramm_qgp1.jpg

3. Einordnung in die Forschung:

[CERN131] www.symmetrismagazine.org/sites/default/files/breaking/wp-content/uploads/2010/11/cernaccelerators.jpg

[CERN132] aliceinfo.cern.ch/Public/Objects/Chapter2/ALICE-SetUp-NewSimple.jpg

4. Prinzip einer TPC:

[CERN133] images.iop.org/objects/ccr/cern/44/1/26/cerntpc2_1-04.jpg

[Ernst1] Zur Verfügung gestellt von Ernst Hellbär aus dem IKF

[Els13] origin-ars.els-cdn.com/content/image/1-s2.0-S0168900210008910-gr2.jpg

[Peters121] Folien der Vorlesung “Teilchendetektoren” im SS 2012 von K.Peters, Kapitel 4 “Ortsmessung”, Seite 2

5. GEM-Folien:

[Desy131] www-flc.desy.de/tpc/img/GEM_photo.jpg

[Desy132] www-flc.desy.de/tpc/img/GEM_field.png

[Peters122] Folien der Vorlesung “Teilchendetektoren” im SS 2012 von K.Peters, Kapitel 4 “Ortsmessung”, Seite 23

[CERN134] gdd.web.cern.ch/GDD/applications.res/quadgem.gif

[Pin08] Aus Literaturquelle [Pin08], Seite 4

[CERN135] <http://gdd.web.cern.ch/GDD/gemgeneral.res/batradio.jpg>

6. Experimenteller Aufbau:

[Eig1] und [Eig2] Aus Eigenproduktion

[Schell13] Zur Verfügung gestellt von Alexander Schell aus der IKF

[Eig3] bis [Eig6] Aus Eigenproduktion

8. Analyse und Auswertung:

[Eig7] bis [Eig16] Aus Eigenproduktion

[Taku1] Freundlicher Weise zur Verfügung gestellt von Taku Gunji, Center for Nuclear Study, University of Tokyo

[Eig17] Aus Eigenproduktion

[Ernst2] Zur Verfügung gestellt von Ernst Hellbär aus dem IKF

[Eig18] bis [Eig37] Aus Eigenproduktion

13 Danksagung

Zunächst möchte ich mich bei der gesamten Arbeitsgruppe im IKF für die konstruktive und freundliche Arbeitsumgebung bedanken.

Besonderen Dank möchte ich aussprechen an:

- Herrn Prof. Dr. Harald Appelshäuser für die Möglichkeit meine Bachelor-Arbeit im IKF schreiben zu können.
Außerdem für die Einblicke in die aktive Arbeit der ALICE-Kollaboration in Form von interessanten Meetings in München und Bautzen.
- Herrn Dr. Rainer Renfordt für die freundliche und kompetent fachliche Betreuung meiner Messungen sowie der gesamten Arbeit.
- Herrn Prof. Dr. Christoph Blume, der spontan und bereitwillig als Zweitprüfer zugesagt hat.
- Den Herrn Werner Amend und Alexander Schell für ihre Aufgeschlossenheit und Fachkompetenz in sämtlichen technischen Fragen und Problemen.
- Herrn Ernst Hellbär für das Korrekturlesen meiner Arbeit, dem zur Verfügungstellen von Abbildungen und einer ständig freundlichen Atmosphäre im gemeinsamen Büro.
- Den Herrn Andreas Arend und Philipp Luettig vom Computing für das ultraschnelle Bearbeiten und Lösen sämtlicher IT-basierender Probleme und Fragen.

Und auch meinem privaten Umfeld, welches besonderen Einfluss auf das Zustandekommen diese Arbeit gehabt hat, möchte ich hier danken:

- Meiner Familie und den Verwandten, die mich soweit gefördert haben und dies weiterhin tun, sodass ich meine universitäre Ausbildung beginnen konnte und weiterhin durchführen kann.
- Besonders meiner Freundin Jennifer, die mich in allen Problemen tatkräftig unterstützt und mir im letzten Jahr erheblich den Rücken gestärkt hat.

Eidesstattliche Erklärung

nach §30 (11) Ordnung für den Bachelor- und den Masterstudiengang

Hiermit erkläre ich,
dass ich die vorliegende Bachelorarbeit selbstständig verfasst und keine anderen als die angegebenen Quellen und Hilfsmittel benutzt habe, dass alle Stellen der Arbeit, die wörtlich oder sinngemäß aus anderen Quellen übernommen wurden, als solche kenntlich gemacht sind und dass die Arbeit in gleicher oder ähnlicher Form noch keiner Prüfungsbehörde vorgelegt wurde.

Frankfurt, den 18. Januar 2014 _____

(David Just)