

Vermessung der Eigenschaften einer Keramik-GEM

Bachelor-Arbeit
zur Erlangung des akademischen Grades
Bachelor of Science
(B.SC)
der Universität Siegen



Department Physik

vorgelegt von
Jan Joachim Hahn

Januar 2016

Einführung

Das Ziel dieser Arbeit ist es, die Funktionsfähigkeit und erreichbare Auflösung von an der Universität Siegen in Zusammenarbeit mit der COAS Corporation produzierten, keramischen Gas Electron Multiplier (GEM) zu testen. Dazu wird in einem ersten Schritt eine kleine Driftkammer, die Testkammer, kalibriert und die Verstärkung der keramischen GEM mit einer kaptonbasierten CERN GEM verglichen. Dabei wird auch die Abhängigkeit der Verstärkung von der Betriebsspannung der GEM und der Zeit untersucht. In einem zweiten Schritt wird die Zeitprojektionskammer (TPC) der Universität Siegen in Betrieb genommen und die keramische GEM zusammen mit zwei CERN GEM eingebaut. Es soll getestet werden, ob eine durch einen Ultraviolett-Laser erzeugte Ionisationsspur mit den GEM verstärkt und durch einen Timepix Chip aufgezeichnet werden kann.

Inhaltsverzeichnis

Abkürzungen	v
1 Grundlagen	1
1.1 Das Standardmodell der Teilchenphysik	1
1.2 Ziele von Detektoren	2
1.3 Detektionsprinzipien	3
1.4 Funktionsweise von Driftkammern	6
1.5 Ziele zukünftiger Experimente	8
1.6 Micropattern Gas Detector und Gas Electron Multiplier	11
1.7 Der Timepix Chip	13
2 Der Versuchsaufbau in Siegen	15
2.1 Verwendete GEM	15
2.2 Testkammer	19
2.3 Zeitprojektionskammer	20
2.4 Gemeinsame Systeme	24
3 Messungen mit der Testkammer	27
3.1 Kalibrierung	27
3.2 Messungen der Verstärkung der GEM	30
3.3 Abhängigkeit der Verstärkung der CERN GEM von der Spannung	32
3.4 Messungen mit den keramischen GEM	34
4 Messungen an der Zeitprojektionskammer (TPC)	41
4.1 Messungen am Hochspannungssystem	41

4.2	Messungen der Zeitprojektionskammer (TPC) mit drei CERN GEMs	46
4.3	Test mit keramischer GEM und Laser	47
5	Ergebnisse	49
5.1	Stabilität der keramischen GEM	49
5.2	Verstärkung der keramischen GEM	49
5.3	Funktion der Zeitprojektionskammer	50
5.4	Ortsauflösung der keramischen GEM	51
5.5	Zusammenfassung	51
6	Geräteliste und Programme	53
6.1	TPC	53
6.2	Testkammer	54
6.3	Verschiedenes	54
6.4	Verbrauchsmaterialien	55
6.5	Programme	55
	Literatur	57

Abkürzungen

ADC	Analog to Digital Converter
ALICE	A Large Ion Collider Experiment
ATLAS	A Toroidal LHC ApparatuS
CERN	Conseil Européen pour la Recherche Nucléaire
CMS	Compact Muon Solenoid
FPGA	Field-programmable Gate Array
FWHM	Halbwertsbreite
GDD	Gas Detectors Development Group
GEM	Gas Electron Multiplier
ILC	International Linear Collider
ILD	International Large Detector
IMB	Intermediate Board
LEP	Large Electron-Positron Collider
LHC	Large Hadron Collider
LHCb	Large Hadron Collider beauty
LTCC	Low Temperature Cofired Ceramic
MCA	Multi Channel Analyzer
MPGD	Micropattern Gas Detector
Pad	Auslesefläche
PCB	Printed Circuit Board
SiD	Silicon Detector
TPC	Zeitprojektionskammer

In diesem Kapitel wird ein kurzer Überblick über die Grundlagen der Detektion von Elementarteilchen gegeben, sowie der Einsatzzweck und das Funktionsprinzip des in dieser Arbeit genutzten Detektors beschrieben.

1.1 Das Standardmodell der Teilchenphysik

Das Standardmodell der Teilchenphysik ist eine theoretische Beschreibung der Wechselwirkungen der Elementarteilchen und erklärt eine große Bandbreite teilchenphysikalischer Ergebnisse. Im Folgenden wird eine kurze Zusammenfassung über die wichtigsten Eigenschaften dieses Modells gegeben.

Bei dem Standardmodell handelt es sich um eine Quantenfeldtheorie, die sowohl die spezielle Relativitätstheorie als auch die Quantenmechanik erfüllt. Es wurde seit den 1970ern mehrfach erweitert und beschreibt alle bisher entdeckten Teilchen und deren Wechselwirkungen mit hoher Präzision. Das Standardmodell beschreibt insgesamt drei Generationen von Spin $\frac{1}{2}$ Teilchen, die Fermionen, wobei jede Generation jeweils zwei Quarks und zwei Leptonen enthält. Die Masse der Teilchen nimmt dabei mit der Generation zu. Dabei ist jeweils eines der Leptonen elektrisch geladen und das andere das ungeladene, zugehörige Neutrino. Dazu kommen zu jedem Teilchen das zugehörige Antiteilchen. Zusätzlich beschreibt das Standardmodell die Eichbosonen, die Spin 1 besitzen. Dabei handelt es sich um die Austauschteilchen für die starke Wechselwirkung (Gluonen), die schwache Wechselwirkung (W^\pm und Z^0) und die elektromagnetische Wechselwirkung (γ). Das Higgs-Boson ist das Austauschteilchen des Higgs-Feldes, welches für die Masse der Teilchen im Standardmodell erforderlich ist. Die Gravitation ist im Standardmodell nicht enthalten [Gri87]. Dabei unterliegen alle Teilchen der schwachen Wechselwirkung, der Gravitation und der Wechselwirkung mit dem Higgs-Feld. Geladene Teilchen unterliegen zusätzlich der elektro-

magnetischen Wechselwirkung. Quarks und Gluonen zeigen zudem starke Wechselwirkung und bauen die sogenannten Hadronen auf.

elektrische Ladung	Generation 1	Generation 2	Generation 3
$-\frac{1}{3}e$	d (down) $4,8 \frac{\text{MeV}}{c^2}$	s (strange) $95 \frac{\text{MeV}}{c^2}$	b (bottom) $4180 \frac{\text{MeV}}{c^2}$
$\frac{2}{3}e$	u (up) $2,3 \frac{\text{MeV}}{c^2}$	c (charm) $1275 \frac{\text{MeV}}{c^2}$	t (top) $173210 \frac{\text{MeV}}{c^2}$
$-1 e$	e (Elektron) $0,511 \frac{\text{MeV}}{c^2}$	μ (Myon) $106 \frac{\text{MeV}}{c^2}$	τ (Tauon) $1777 \frac{\text{MeV}}{c^2}$
$0 e$	ν_e (Elektron-Neutrino) $< 2 \frac{\text{eV}}{c^2}$	ν_μ (Myon-Neutrino) $< 0,18 \frac{\text{MeV}}{c^2}$	ν_τ (Tau-Neutrino) $< 18 \frac{\text{MeV}}{c^2}$

Wechselwirkung	Austauschteilchen	Masse
elektromagnetisch	γ (Photon)	$0 \frac{\text{MeV}}{c^2}$
stark	g (Gluon)	$0 \frac{\text{MeV}}{c^2}$
schwache	W^\pm (W-Boson)	$80 \frac{\text{GeV}}{c^2}$
	Z^0 (Z-Boson)	$91 \frac{\text{GeV}}{c^2}$
Higgs	H (Higgs-Boson)	$125 \frac{\text{GeV}}{c^2}$

Tab. 1.1: Die Teilchen des Standardmodells der Teilchenphysik [Oli+14]

Mit der Entdeckung des Top-Quarks am Tevatron und des Higgs-Bosons am CERN sind alle vorhergesagten Teilchen entdeckt, eine Auflistung ist in Tabelle 1.1 zu finden. Allerdings gibt es noch offene Fragen, zum Beispiel nach der Verletzung von Symmetrien und Erhaltungsgrößen oder der Vereinigung mit der allgemeinen Relativitätstheorie und damit der Gravitation.

1.2 Ziele von Detektoren

Teilchendetektoren werden zum Nachweis von Elementarteilchen genutzt. Dabei messen Spurdetektoren die Position des Teilchens im Raum, während Kalorimeter die Energie messen. Aus diesen Informationen kann anschließend die Spur der Teilchen im Detektor rekonstruiert werden, welche Rückschlüsse auf das Teilchen, sowie seinen Impuls, die Lebensdauer und die Zerfallskanäle erlaubt.

Es ist von Vorteil, wenn sich möglichst wenig Material zwischen dem Kollisionspunkt und den Kalorimetern befindet, damit die gemessenen Teilchen nicht schon vor den Kalorimetern Energie verlieren. In modernen Beschleunigerexperimenten sind außerdem, bedingt durch

die hohe Kollisionsrate, die Anforderungen an die Auslesegeschwindigkeit und Resistenz gegen Strahlenschäden gestiegen. Gleichzeitig gibt es Beschränkungen durch die Abwärme der Elektronik, den zur Verfügung stehenden Raum und die Kosten. Diese verschiedenen Anforderungen haben eine Vielzahl an Detektortypen hervorgebracht, von denen in dieser Arbeit auf Driftkammern und deren Auslese mit Timepix Chip und GEM für die Verstärkung vorgestellt werden.

1.3 Detektionsprinzipien

Die Grundlage für den Nachweis der Teilchen ist deren Energieabgabe an das Material des Detektors, welche auf verschiedene Arten nachgewiesen und aufgezeichnet wird. Dabei sind, abhängig von der Art der Teilchen, verschiedene Prozesse wichtig. In den meisten Detektoren ist das Deponieren von Energie durch geladene Teilchen der wichtigste Prozess. Spurdetektoren weisen üblicherweise die von geladenen Teilchen deponierte Energie nach und sind nicht in der Lage, ungeladene Teilchen wie Photonen oder neutrale Hadronen nachzuweisen. In Kalorimetern zur Energiemessung werden sowohl geladene als auch ungeladene Teilchen nachgewiesen, indem die energiereichen Teilchen z.B. durch das Passieren von Absorberplatten zur Erzeugung von Teilchenschauern angeregt werden. Aus der Entwicklung eines solchen Schauers können dann weitere Informationen extrahiert werden.

Im Folgendem werden die für diese Arbeit wichtigen Wechselwirkungen von Photonen und geladenen Teilchen genauer erklärt, welche für Gasdetektoren relevant sind. Diese Wechselwirkung ist ausschließlich elektromagnetisch.

1.3.1 Ionisation durch geladene Teilchen

Geladene Teilchen geben Energie an die Materie ab, die sie passieren. Durch ihre Ladung und Bewegung erzeugen sie ein sich zeitlich und räumlich änderndes, elektromagnetisches Feld. Dieses Feld wechselwirkt mit in der Nähe befindlichen Elektronen und Atomkernen und kann auf diese Energie übertragen. Der Energieverlust des schnellen Teilchens kann verschiedene Effekte haben. Am wichtigsten sind die Anregung und Ionisation von Atomen. Mit Hilfe der Bethe-Bloch Formel der Energieverlust pro Strecke angegeben werden.

$$\frac{dE}{dx} = \frac{4\pi N e^4}{m_e c^2 \beta^2} z^2 \left(\ln \frac{2m_e c^2 \beta^2 \gamma^2}{I} - \frac{\beta^2}{2} - \frac{\delta(\beta)}{2} \right) \quad (1.1)$$

[BRR08, S. 32] Dabei sind $\beta = \frac{v}{c}$ und $\gamma = \frac{1}{\sqrt{1-\beta^2}}$ abhängig von der Geschwindigkeit v des Teilchens mit der Ladung z . Die Elektronendichte N des durchquerten Mediums, die mittlere Anregungsenergie der Atome I und der Abschirmeffekt durch Polarisation $\delta(\beta)$ sind mate-

rialabhängig. In Abbildung 1.2 ist der Energieverlust pro Massenbelegung für verschiedene Materialien dargestellt, in Abhängigkeit von $\beta\gamma$.

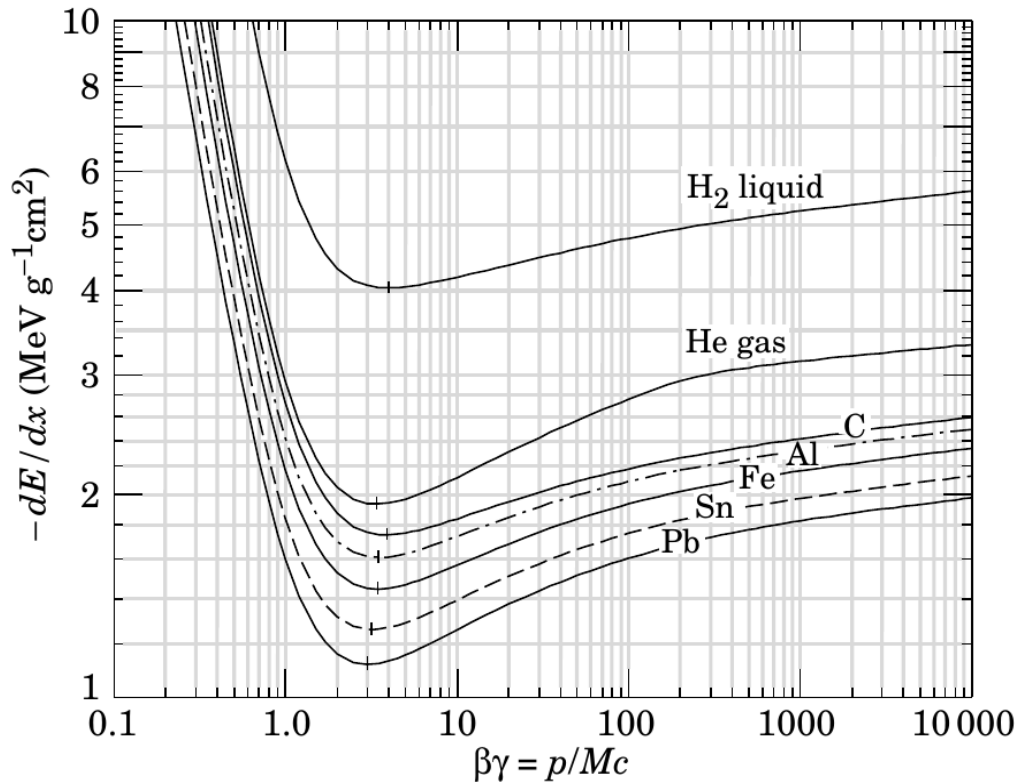


Abb. 1.1: Der Energieverlust von geladenen Teilchen in Materie, übernommen aus [Oli+14][27. Passage of particles through matter]

Da der Energieübertrag an das passierte Material statistischen Fluktuationen unterliegt, besteht eine derartige Spur aus einer Kette aus unterschiedlich großen Anhäufungen von ionisierten Atomen, die als Cluster bezeichnet werden.

1.3.2 Cherenkovstrahlung und Bremsstrahlung

Wenn geladene Teilchen sich schneller als die Lichtgeschwindigkeit in einem Medium bewegen, so können sie Cherenkovstrahlung emittieren. Dieser Prozess ist insbesondere für optisch dichtere Medien, wie Flüssigkeiten und Festkörper, relevant und kann Informationen über die Geschwindigkeit und die Bahn des geladenen Teilchens liefern.

Bremsstrahlung ist elektromagnetische Strahlung, die durch die Beschleunigung von Ladungsträgern entsteht. Für Elektronen ist das meistens die Wechselwirkung mit einem Atomkern. Die Verluste durch Bremsstrahlung steigen mit der Kernladungszahl stark an und sind

bei leichten und mittelschweren Elementen gering.

Diese Prozesse spielen in dieser Arbeit nur eine untergeordnete Rolle und werden nur aus Gründen der Vollständigkeit erwähnt.

1.3.3 Ionisation durch Röntgenphotonen

Die Ionisation eines Gases durch Röntgenstrahlung ist für Kalibrierung wichtig. Durch die Verwendung von radioaktiven Präparaten, die monoenergetische Strahlung emittieren, können genau definierte Energiemengen im Gas deponiert werden. Die Grundlage ist die Absorption der Photonen durch Elektronen der Atome, der Photoeffekt. Dabei wird ein Photon, das mehr Energie als die Bindungsenergie des Elektrons hat, absorbiert und ein Elektron freigesetzt. Bedingt durch die Energieerhaltung trägt dieses Elektron die Differenz zwischen der Photonenenergie und der Bindungsenergie des Elektrons in der Atomhülle. Dieses energiereiche Elektron kann durch Ionisation weitere Elektronen freisetzen, bis seine Energie kleiner ist als die Bindungsenergie.

Bei dem Auffüllen der unbesetzten Position des Atoms kann es zur Emission von charakteristischen Röntgenphotonen kommen, welche teilweise das Zählgas verlassen. Diese Ereignisse erzeugen zusätzliche Peaks im Spektrum, die sogenannten escape peaks, deren Energie um die Energie der betreffenden Röntgenlinie verringert ist.

1.3.4 Ionisation durch Ultraviolett-Laser

Die Ionisation durch ultraviolettes Licht hat einige Besonderheiten. Photonen im ultravioletten Teil des Spektrums haben Energien bis zu 6 eV und Wellenlängen von etwa 200 nm, allerdings beträgt die Ionisationsenergie der in dieser Arbeit verwendeten Gase Argon und Kohlenstoffdioxid 15,78 eV und 13,81 eV [BRR08, S. 6]. Da die Ionisation nicht direkt durch Photoeffekt stattfinden kann, können die Atome lediglich angeregt werden. Erst durch die Anregung in mehreren Schritten, die über kurzlebige Zwischenzustände geht, ist eine Ionisation dieser Gase möglich. Durch die hohe Leistungsdichte in einem Laserstrahl ist die Wahrscheinlichkeit einer derartigen Mehrfachabsorption groß genug, um eine Spur aus Elektronen und Ionen zu erzeugen.

1.3.5 Weitere Wechselwirkungen von Photonen mit Materie

Bei geringen Energien werden Photonen lediglich gestreut oder regen die Atome und Moleküle an. Erst, wenn die Photonenenergie in den Bereich der Gammastrahlung gelangt, treten zusätzlich der Comptoneffekt und ab ca 1 MeV zusätzlich Paarproduktion auf. Dabei ist der wichtige Unterschied zwischen Streuung und Comptoneffekt, dass sich beim Comptoneffekt sowohl die Bewegungsrichtung als auch die Energie des Photons ändert, während sich bei

der Streuung lediglich die Bewegungsrichtung ändert. Außerdem können bei ausreichender Photonenenergie Atomkerne angeregt werden und bei noch höheren Energien durch Kernphotoeffekt und Photodesintegration sogar zerlegt werden. Auch diese Prozesse werden nur aus Gründen der Vollständigkeit erwähnt.

1.4 Funktionsweise von Driftkammern

Driftkammern sind Teilchendetektoren, bei denen die Teilchen ein Gasvolumen durchlaufen und in diesem durch Ionisation Spuren aus Ionen und freien Elektronen erzeugen. Die erzeugten, freien Ladungsträger werden durch das im Inneren der Kammer erzeugte elektrische Feld getrennt und die Elektronen wandern auf das Ende mit dem Auslesesystem zu, wo sie verstärkt und weiterverarbeitet werden. Die positiven Ionen wandern zur Kathode, wo sie neutralisiert werden.

Bei Driftkammern gibt es viele verschiedene Bauformen, von denen in dieser Arbeit lediglich die Zeitprojektionskammer (TPC) behandelt wird. Diese wird in Kapitel 1.5.4 und 2.3 genauer erklärt, nachdem die physikalischen Grundlagen erläutert wurden.

1.4.1 Drift von geladenen Teilchen in elektromagnetischen Feldern

In diesem Abschnitt wird ein kurzer Überblick über das Verhalten von Ladungsträgern in Gasen gegeben, welches für die Funktion von Gasdetektoren, in diesem Fall Driftkammern, wichtig ist. Es ist zu beachten, dass Gase sensitiv auf Änderungen von Druck und Temperatur sind und Veränderungen dieser Parameter immer Einfluss auf die Drift haben.

Mit q geladene Teilchen mit der Geschwindigkeit \vec{v} erfahren durch das elektromagnetische Feld eine Lorentzkraft \vec{F} .

$$\vec{F} = q(\vec{E} + \vec{v} \times \vec{B}) \quad (1.2)$$

Im Folgenden wird der Fall $\vec{B} = \vec{0}$ angenommen, also die Abwesenheit eines magnetischen Feldes, sowie ein homogenes elektrisches Feld \vec{E} . Für eine vollständige Diskussion für $\vec{B} \neq 0$ sei auf [BRR08, Kapitel 2] verwiesen, von wo die folgenden Formeln zitiert werden.

Das homogene elektrische Feld im Inneren einer Driftkammer bewirkt eine konstante Beschleunigung der Ladungsträger, die als einfach geladen angenommen werden, also $q = \pm e$. Durch Stöße mit den Gasatomen können sie Impuls verlieren, diese Stöße wirken bei einer makroskopischen Betrachtung wie eine Reibung mit der Konstante K auf die Ladungsträger.

Die Bewegungsgleichung ist in (1.4) gegeben, ihre Lösung in (1.5).

$$\tau = \frac{m}{K}, \mu = \frac{e\tau}{m} \quad (1.3)$$

$$m \frac{d\vec{u}}{dt} = e\vec{E} - K\vec{u} \quad (1.4)$$

$$\vec{u} = \frac{e}{m} \tau \vec{E} = \mu \vec{E} \quad (1.5)$$

Die für die Driftkammern interessante Größe ist meistens die mittlere Driftgeschwindigkeit \vec{u} . Sie hängt von der Mobilität μ der Ladungsträger ab, oder in einer anderen Betrachtungsweise von der mittleren Zeit zwischen Stößen τ oder der Reibungskonstanten K . Diese Betrachtungsweisen sind äquivalent und die Driftgeschwindigkeit ist im Allgemeinen abhängig von der Gasmischung, dem betrachteten Ladungsträger und der Feldstärke. Durch ihren hohen Wirkungsquerschnitt und die etwa gleich großen Massen verlieren Ionen sehr effizient Energie an die Gasatome durch Stöße und driften dadurch viel langsamer als Elektronen. Aus diesem Grund sind für das Signal in Driftkammern insbesondere die Elektronen relevant, da sie sehr schnelle Signale erzeugen, welche sich zusätzlich durch die im nächsten Abschnitt erklärte Gasverstärkung verstärken lassen. Zu Beachten ist außerdem, dass die Stöße mit den Gasatomen die Bewegung der Elektronen beeinflussen. Dies zeigt sich als Diffusion der Ladungsträger, wodurch die Ortsauflösung mit steigender Driftdistanz abnimmt. Die Diffusionsgeschwindigkeit ist unter anderem abhängig von den elektrischen und magnetischen Feldern und der Gasmischung.

1.4.2 Stossionisation und Gasverstärkung

Die Stöße sind im Fall der Drift in schwachen elektrischen Feldern relativ energiearm, weil die Ladungsträger zwischen zwei Stößen nur wenig Energie aus dem elektrischen Feld aufnehmen können. Wenn die Driftgeschwindigkeit zum Beispiel durch höhere Feldstärken steigt, so haben die driftenden Teilchen eine größere Energie und die Stöße werden heftiger. Die äußeren Elektronen der Gasatome sind am schwächsten gebunden und können durch ausreichend energiereiche Stöße mit Elektronen oder Atomen aus dieser Bindung gelöst werden. Bei ausreichend hoher Feldstärke können so freigesetzte Elektronen ebenfalls Elektronen freisetzen. Dieser als Gasverstärkung oder Townsend-Entladung bezeichnete Prozess lässt die Anzahl der Elektronen exponentiell anwachsen. So kann das Signal vor der Auslese vergrößert werden. Die Differentialgleichung für die Verstärkung lautet [BRR08, S. 132].

$$dN = N\alpha ds \quad (1.6)$$

Dabei ist N die Anzahl der Ladungsträger und α der Townsend Koeffizient, welcher von Gasmischung, Dichte und Feldstärke abhängig ist. Mit dN wird die Änderung der Anzahl an

Ladungsträgern auf einer Strecke ds bezeichnet. Der Anteil der Ionen an der Verstärkung ist viel kleiner als der Beitrag der Elektronen, bedingt durch die unterschiedlichen Driftverhalten von Elektronen und Ionen im Gas. Für jedes Elektron wird ein positiv geladenes Ion erzeugt.

1.5 Ziele zukünftiger Experimente

Der Large Hadron Collider (LHC) ist mit einer Schwerpunktsenergie für Protonenkollisionen von bis zu 14 TeV in der Lage, auf höheren Energien als jemals zuvor eine große Anzahl von Kollisionen zu erzeugen, die von den dortigen Experimenten A Toroidal LHC Apparatus (ATLAS), Large Hadron Collider beauty (LHCb), Compact Muon Solenoid (CMS) und A Large Ion Collider Experiment (ALICE) beobachtet werden. So konnte das Higgs Boson nachgewiesen werden und die Eigenschaften von bereits bekannten Teilchen noch präziser gemessen werden. Allerdings sind Protonen keine Elementarteilchen und verursachen durch ihre Substruktur aus Quarks und Gluonen zusätzliche Effekte, welche die Präzision der Messungen einschränken. So bewirkt die Verteilung des Gesamtimpulses des Protons auf seine Bestandteile, dass die Schwerpunktsenergie der wechselwirkenden Elementarteilchen nicht genau angegeben werden kann. Außerdem erzeugen die Kollisionen von Protonen viel Untergrund durch Prozesse der Quantenchromodynamik, welcher von den gesuchten, seltenen Prozessen getrennt werden müssen.

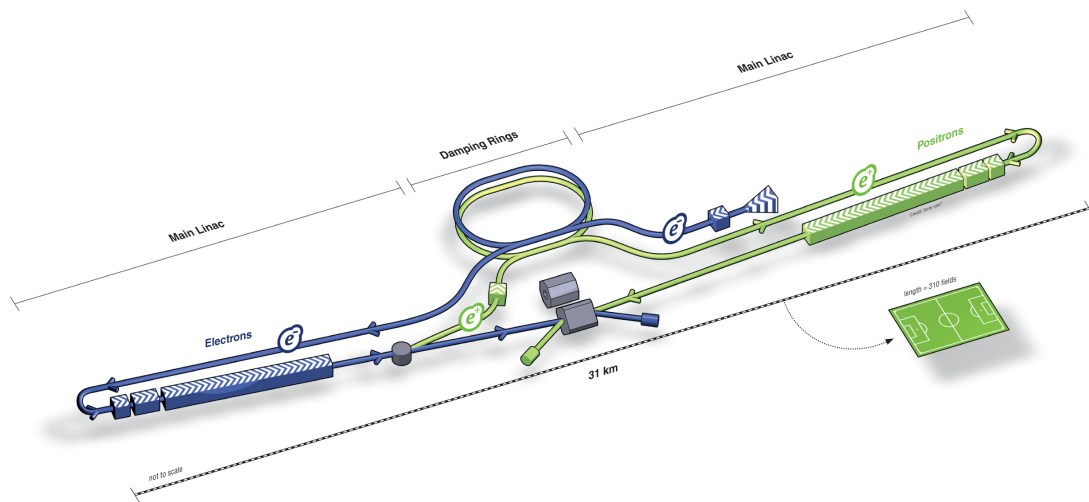
1.5.1 Der International Linear Collider

Durch die Verwendung von Elektronen und Positronen, welche keine messbare Substruktur haben, ist die Schwerpunktsenergie für die Kollisionen einstellbar und Besonderheiten wie Resonanzen können sehr gut gemessen werden. So konnte am Large Electron-Positron Collider (LEP) beispielsweise die Resonanz des Z^0 -Bosons genau vermessen werden und seine Zerfallsprozesse detailliert untersucht werden.

Allerdings sind bei Ringbeschleunigern für Elektronen die Energieverluste durch Bremsstrahlung groß, da diese wie $r^2 \gamma^4$ mit dem Lorentzfaktor γ und dem Bahnradius r läuft. Deshalb wird der ILC als Linearbeschleuniger geplant, bei dem die Elektronen und Positronen auf einer Geraden beschleunigt werden und somit die Produktion von Bremsstrahlung vermieden wird. Die geplante Schwerpunktsenergie von 250 GeV mit der Möglichkeit, diese auf bis zu 1 TeV zu steigern, ermöglicht Messungen des Z^0 Bosons, sowie der Paarproduktion von $W^+ W^-$ -Bosonen und die Kopplung von Z^0 -Boson und Higgs, $Z^0 h$. Der Ausbau auf 1 TeV würde das Messen weiterer Kopplungen zwischen Higgs, W^\pm und Z^0 ermöglichen, außerdem werden Tests auf Erweiterungen des Standardmodells der Teilchenphysik möglich und es können Top-Quarks durch Paarproduktion erzeugt werden [Beh+13].

Da Elektronenstrahlen polarisierbar sind, ist der Einfluss des Spins auf den Wirkungsquerschnitt beobachtbar.

Diese Eigenschaften würden dem ILC ermöglichen, das Standardmodell der Teilchenphysik und die Eigenschaften der bereits bekannten Teilchen mit noch größerer Präzision zu untersuchen. Insgesamt wird der ILC, wie in Abbildung 1.3 dargestellt, zwei jeweils 11 km lange Linearbeschleuniger (Main Linac) besitzen und der gesamte Komplex eine Gesamtlänge von 31 km erreichen. Die Positronen werden erzeugt, indem ein Undulator im Linearbeschleuniger für die Elektronen Synchrotronstrahlung erzeugt, welche durch Paarproduktion in einem Metallblock die benötigten Positronen erzeugen. Sowohl Elektronen als auch Positronen werden als Pakete (bunches) in zwei Speicherringen (Damping Rings) gesammelt und dort komprimiert und fokussiert. Beim Eintritt in den Hauptbeschleuniger werden sie ein letztes mal komprimiert und dann bis auf ihre Kollisionsenergie beschleunigt.



ILC Scheme | © www.form-one.de

Abb. 1.2: Schema des ILC [Beh+13]

1.5.2 Die Detektoren für den International Linear Collider

Es sind zwei verschiedene Detektoren vorgesehen, von denen immer nur einer in Position für die Datennahme sein kann, während der zweite Detektor sich in seiner Parkposition befindet. Beide haben den für moderne Detektoren typischen Aufbau aus mehreren Schichten, wobei von innen nach außen erst Spurdetektoren und dann Kalorimeter den Kollisionspunkt umgeben. Der gesamte Aufbau ist umgeben von einem Magneten, dessen Magnetfeld

die Spuren der geladenen Teilchen krümmt und durch die Krümmung die Ladung und den Impuls der Teilchen messbar macht. Die äußerste Lage mit dem Magneten beinhaltet zusätzlich ein System zur Identifikation und Messung von Myonen, die den Detektor verlassen und oft als Kriterium für interessante Ereignisse dienen.

Der Silicon Detector (SiD) ist ein Detektor, dessen gesamte Spurrekonstruktion und Kalorimeter auf Siliziumdetektoren basieren werden. Der zweite Detektor ist der International Large Detector (ILD), auf den im folgenden genauer eingegangen wird.

1.5.3 Der International Large Detector

Der ILD ist wie bereits erwähnt mehrschichtig aufgebaut. Der innerste Detektor ist der Vertex Detector, ein Siliziumdetektor ähnlich dem Pixel Detektor von ATLAS, zur Spurverfolgung mit Hilfe von sehr kleinen Siliziumpixeln. Direkt um diesen wird eine Zeitprojektionskammer liegen, die ihrerseits von den elektromagnetischem und hadronischem Kalorimeter umgeben wird, welche als Sandwich oder Sampling-Kalorimetern ausgeführt sind. In diesen werden die Teilchen durch Metallplatten gebremst und zur Entwicklung von Teilchenschauern angeregt. Durch zwischen diesen Platten liegende Sensoren wird dieser Schauer gemessen. Die Kalorimeter dienen zur Energiemessung und helfen bei der Teilchenidentifikation, zum Beispiel die Unterscheidung von Gammastrahlung und neutralen Hadronen. Die beiden Kalorimeter unterscheiden sich in der Wahl des Absorbermaterials und der Auslesesysteme zwischen den Platten. Die äußerste Lage bildet das Magnetsystem mit in die Struktur integrierten Myonendetektoren. Zusätzliche Teilsysteme in den Enden des Detektors messen die Luminosität und Teilchen, die sich fast parallel zum Teilchenstrahl bewegen, um ein möglichst vollständiges Bild der Ereignisse im Wechselwirkungspunkt zu erhalten.

1.5.4 Die Zeitprojektionskammer des International Large Detector

Die Zeitprojektionskammer (TPC) umgibt zylindrisch den Vertex Detector und ihre Maße sind in der Tabelle 1.2 zusammengefasst.

Innendurchmesser	658 mm
Aussendurchmesser	3616 mm
Gesamtlänge	4700 mm

Tab. 1.2: Maße für die TPC des ILD

In der Mitte der Driftkammer wird die Kathode sitzen, so dass die Elektronen der Spuren mit konstanter Geschwindigkeit auf die Enden mit den Auslesesystemen zudriften. Diese nehmen die Projektion der Spur auf die Enden des Zylinders auf, während aus der Driftzeit

der Elektronen deren Position entlang der Zylinderachse rekonstruiert werden kann. Derzeit werden mehrere Kandidaten für das Auslesesystem untersucht, zu denen GEMs zur Verstärkung und Siliziumchips für die Auslese gehören. Aber auch die Verwendung von anderen Technologien wie Micromegas (Micro Mesh Gaseous Detecor) für die Verstärkung und Ausleseflächen (Pads) für die Auslese sind möglich.

Die gesamte TPC wird bevorzugt aus Kompositwerkstoffen gefertigt werden, um möglichst wenig Strahlungslängen X_0 Material zwischen dem Vertex Detector und den Kalorimetern einzubringen. Es sollen $0,05 X_0$ für den Bereich des Feldkäfigs und $0,25 X_0$ für die Endplatten erreicht werden.

1.6 Micropattern Gas Detector und Gas Electron Multiplier

Micropattern Gas Detector (MPGD) sind Verstärker für Ladungsträger, welche in Gasdetektoren eingesetzt werden, um die Ladungsmenge vor der Auslese zu erhöhen. Gas Electron Multiplier (GEM) und Micromegas zählen beide zu den MPGD. Sie sind eine relativ neue Entwicklung und haben viele Vorteile gegenüber Drahtkammern, bei denen die Verstärkung in der Nähe von Drähten stattfindet, ähnlich wie bei einem Geiger-Müller Zählrohr. Dazu gehören unter anderem eine höhere Ortsauflösung und weniger Materialbedarf. In einer Drahtkammer müssen die Drähte so gespannt werden, dass sie durch die Schwerkraft und elektrostatische Effekte nicht durchhängen, was bei mehreren tausend Drähten zu großen Kräften führt [BRR08]. Die Verwendung von MPGD hat unter diesen Aspekten Vorteile, da sie durch leichte Rahmen getragen werden können.

MPGDs nutzen eine regelmäßige Struktur, bei der in den gasgefüllten Bereichen sehr hohe Feldstärken erzeugt werden. Durch ihre Struktur wird dabei die laterale Ausbreitung der Entladung eingeschränkt, so dass die Ortsauflösung hoch ist. Gleichzeitig sorgen die hohen erreichbaren Feldstärken für eine entsprechend große Verstärkung, insbesondere können mehrere GEMs hintereinander angeordnet werden, so dass sich ihre Verstärkungen multiplizieren.

1.6.1 Gas Electron Multiplier

Gas Electron Multiplier (GEM) zählen zu den Micropattern Gas Detector (MPGD) und wurden 1997 am CERN von Fabio Sauli und der Gas Detectors Development Group (GDD) entwickelt [Sau]. Sie basieren auf dünnen Schichten eines Isolators, welcher auf beiden Seiten mit einem elektrischen Leiter beschichtet ist und mit einem regelmäßigen Lochmuster versehen ist. Durch das Anlegen einer Spannungsdifferenz zwischen den beiden Metallschich-

ten werden Elektronen in den Löchern stark beschleunigt und setzen durch Stoßionisation weitere Elektronen frei. Durch die hohen erreichbaren Feldstärken in den Löchern können große Verstärkungen ohne elektronische Verstärker erreicht werden, womit man das Rauschen elektronischer Bauteile in dieser Phase der Signalverarbeitung vermeiden kann. In der Abbildung 1.3 ist ein Beispiel für die Lochstruktur einer GEM dargestellt.

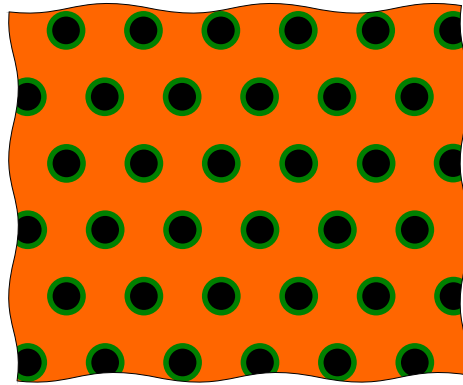


Abb. 1.3: Beispiel für das Lochmuster einer GEM mit hexagonaler Anordnung von konischen Löchern. Schwarz für die Löcher, orange für den elektrischen Leiter und grün für freiliegenden Isolator

Zusätzlich schränken die Löcher die laterale Ausbreitung der sich entwickelnden Lawine ein und ermöglichen so gute Ortsauflösungen. Ein weiterer Vorteil dieser Art der Verstärkung ist, dass ein Teil der entstehenden Ionen direkt auf der Kathodenseite der GEM neutralisiert wird und nicht zur Kathode der TPC driftet. Dies verringert Probleme mit Raumladungen durch die driftenden Ionen. Allerdings bringen die hohen Feldstärken und die Kapazität zwischen den Metallflächen das Risiko von Überschlügen innerhalb der GEM, welche die GEM beschädigen können.

Wenn man die Gleichung für die Ladungsverstärkung durch Stoßionisation bei konstanter Dichte und Feldstärke über die Strecke s integriert, so kann man die Ladungsverstärkung berechnen.

$$\frac{N}{N_0} = e^{\alpha s} = G \quad (1.7)$$

Dabei ist N_0 die ursprüngliche Anzahl an Elektronen und N die Anzahl nach der Verstärkung. Die Anzahl der Ladungsträger wurde dabei mit dem Faktor G , als Verstärkung oder Gain bezeichnet, multipliziert. Der Townsend Koeffizient α ist für verschiedene Gasgemische und Dichten als Funktion der Feldstärke gemessen, für Argon und Kohlenstoffdioxid

beispielsweise in [Aur+] und [AS].

$$G(U) = e^{a+bU} \quad (1.8)$$

Die Verstärkung einer GEM folgt einer Exponentialfunktion und kann mit den Parametern a und b sowie der Spannung U über die GEM berechnet werden.

1.7 Der Timepix Chip

Der Timepix Chip ist eine Weiterentwicklung des Medipix2. Er wurde am CERN entwickelt und ist ein Siliziumchip mit 256×256 Pixeln mit $55 \mu\text{m}$ Seitenlänge. Die quadratische, aktive Fläche beträgt rund 2 cm^2 und ist sensitiv für deponierte Ladung. [Mpi]

Jedes Pixel hat einen eigenen ladungssensitiven Verstärker und einen Diskriminator. Über eine Kapazität kann zwecks Kalibrierung eine Testladung in den Verstärker injiziert werden, wenn das Testbit für die betreffende Zelle gesetzt wurde. Der Diskriminator wertet das Signal des Verstärkers aus und vergleicht es mit einer als Threshold bezeichneten Schwelle. Diese kann, abhängig von der Anwendung, positiv oder negativ gewählt werden. Die Höhe der Schwelle setzt sich aus einem globalen Wert und der Korrektur für das individuelle Pixel zusammen. Dabei ist die Linearität des Pixels bis 50.000 Elektronen sichergestellt [Cud07, Kapitel 5]. An diesen analogen Teil schließt sich der digitale Teil des Auslesesystems an, dessen Funktion hier nur kurz erläutert wird. Der erste Teil ist das Mask-Bit, welches den analogen Teil von dem digitalen Teil des Pixels trennt und so für die Auslese "maskieren" kann. Dann folgt die Timepix Synchronization Logic, welche zwei Bits für den Auslesemodus, sowie je einen Eingang für die interne Uhr des Pixels und den Shutter hat. Der Shutter kann intern oder extern erzeugt werden und liefert das Start/Stop Signal für die Zeitmessungen. Messungen können nur dann stattfinden, wenn der Shutter geöffnet ist. Die interne Uhr des Timepix Chips, als reference clock bezeichnet, ermöglicht die für viele Auslesemodi erforderlichen Zeitmessungen und kann intern erzeugt oder extern in den Chip eingespeist werden, damit mehrere Chips synchronisiert werden können. Jedes Pixel hat ein eigenes 14-Bit Register, welches die Konfiguration für das Pixel speichert und einen Zähler mit einem Maximalwert von 11810 für die Messung beinhaltet. Weitere Komponenten ermöglichen das Lesen und Schreiben dieses Registers. Für eine ausführliche Beschreibung sei auf [Cud07] verwiesen.

Im Vergleich zum Medipix2 Chip hat der Timepix Chip unter anderem eine stark erhöhte Resistenz gegen Strahlenschäden, eine höhere Verstärkung und eine bessere Energieauflösung. Der lineare Bereich des Timepix Chips ist dafür kleiner und er besitzt nur eine untere Schwelle, anstatt wie der Medipix2 eine obere und eine untere Schwelle für den Diskriminator. Weitere Modifikationen in der Chiparchitektur verbessern die Zeitauflösung und die

Homogenität der Pixel.

Für jedes Pixel können Mask-Bit, Korrektur des Threshold und das Testbit für die Ladungsinjektion zur Kalibrierung individuell gesetzt werden. Zwei weitere Bits bestimmen, wie bereits erläutert, die Art der genommenen Daten, indem sie vier in Tabelle 1.3 angegebenen Modi kodieren.

Modus	Effekt
Medipix:	Zählt die Anzahl der Ereignisse, die eine Schwelle überschritten haben
1Hit:	Zeigt nur an, ob das Pixel die Schwelle mindestens ein mal überschritten hat
TOT:	Mißt, wie lange das Pixel über einer Schwelle war, wird für die Bestimmung der Energiemenge oder der Ladung genutzt
TOA:	Mißt, wann das Pixel die Schwelle überschritten hat, wird bei der Bestimmung der Ankunftszeit genutzt

Tab. 1.3: Modi des Timepix Chips

Für diese Arbeit ist insbesondere der TOT Modus wichtig, welcher zur Messung der deponierten Ladung genutzt werden kann. Dazu wird gemessen, wie lange das Signal des Verstärkers über der Schwelle des Diskriminators bleibt und aus dieser Zeit mit Hilfe der Kalibration die gesamte Ladungsmenge für das betreffende Pixel bestimmt werden.

Der Timepix Chip kann über verschiedene Hardware und Softwarepakete angesteuert werden. Die folgende Diskussion beschränkt sich auf die an der Universität Siegen genutzte Kombination, weitere Informationen können in der Dokumentation dieses Softwarepakets gefunden werden [KL]. Die Auslese mit dem Softwarepaket TOS kann in zwei verschiedenen Modi erfolgen. Es können alle 65536 Pixel ausgelesen werden und als 256×256 Matrix gespeichert werden, oder es werden nur die Pixel über der Schwelle ausgelesen und als Liste gespeichert. Beide Modi haben Vorteile und Nachteile. Das Auslesen aller Pixel ist langsamer und benötigt mehr Speicherplatz, allerdings funktioniert das Auslesen unabhängig von der Anzahl der Pixel, die über der Schwelle sind. Das Auslesen im nullunterdrückten Modus, im folgenden als zerosupressed bezeichnet, ist schneller und benötigt weniger Speicherplatz, da lediglich die Position und der Wert der Pixel über der Schwelle gespeichert wird. Allerdings können in diesem Modus maximal 4096 Pixel ausgelesen werden und die Information aller weiteren Pixel über der Schwelle geht verloren.

Der Versuchsaufbau in Siegen

Der Versuchsaufbau in Siegen besteht aus drei Teilen: Der Testkammer für Funktionsprüfungen der Gas Electron Multiplier (GEM) und die Bestimmung ihrer Verstärkung, der eigentlichen Zeitprojektionskammer (TPC) für die Messung der Auflösung und den von beiden Kammern gemeinsam genutzten Komponenten. Das genutzte Gasgemisch besteht zu 80% aus Argon und 20% Kohlenstoffdioxid und wird nach einmaliger Passage der Kammer an die Außenluft abgegeben. Es handelt sich um einen offenen Kreislauf.

2.1 Verwendete GEM

Es wurden zwei Typen von GEMs getestet, bei denen die aktive Fläche jeweils $5 \times 5 \text{ cm}^2$ beträgt. Es handelt sich um CERN GEMs und an der Universität Siegen in Zusammenarbeit mit der Firma COAS entwickelte keramische GEMs. Jede verwendete GEM kann über ihre Nummer eindeutig identifiziert werden. Dabei tragen keramische GEM ein C vor ihrer Nummer, während die CERN GEMs fortlaufend nummeriert sind. Im Folgendem werden die Spezifikationen beider Typen genauer erläutert und verglichen.

2.1.1 CERN GEM

CERN GEMs basieren auf einer Kaptonfolie mit $50 \mu\text{m}$ Dicke. Diese ist auf beiden Seiten mit einer $5 \mu\text{m}$ dicken, passivierten Kupferschicht belegt. In diese Folie sind doppelt konische Löcher in einem hexagonalen Muster eingätzt. Die Löcher haben in der Kupferschicht einen Durchmesser von $70 \pm 5 \mu\text{m}$, der sich in der Kaptonschicht auf $50 \pm 5 \mu\text{m}$ reduziert. Der Lochabstand beträgt $140 \mu\text{m}$ [EM05] und die aktive Fläche $5 \times 5 \text{ cm}^2$. Die GEM ist auf einen Rahmen aufgeklebt und wird an den Kontaktflächen durch angelötete Drähte mit der Spannungsversorgung verbunden.

2.1.2 Keramische GEM

Die keramische GEM ist eine $9 \times 9 \text{ cm}^2$ große Keramikstruktur mit 0,120 mm Dicke und einer aktiven Fläche von $5 \times 5 \text{ cm}^2$. Es handelt sich dabei um eine Low Temperature Cofired Ceramic (LTCC), also eine Keramik, bei der die Leiterbahnen und das Grundmaterial im gleichen Schritt gebrannt werden. Die Metallaufgabe ist mehrschichtig und besteht aus einer Unterlage aus Silber, welche direkt in die Keramik integriert ist und mitgebrannt wurde. Darüber liegt eine nach dem Brennen aufgebraute Schicht Nickel mit 2 – 6 μm Dicke, die von einer 0,06 – 0,15 μm dicken Goldschicht abgeschlossen wird. Die Löcher wurden vor dem Brennen in den Grünling gestantzt.

Die Löcher sind, wie bei der CERN GEM, in einem hexagonalen Muster angeordnet. Die keramische GEM hat 200 μm Lochdurchmesser und 400 μm Lochabstand mit zylindrischen Löchern. Sie ist auf einen Rahmen aus Keramik aufgeklebt und wird mit aufgeklebten Kupferstreifen und an diesen angelöteten Drähten an die Spannungsversorgung angeschlossen [Wer].

2.1.3 Vergleich von keramischer und CERN GEM

In Tabelle 2.1 werden die Materialien und Maße von CERN GEM mit denen der keramischen GEM verglichen. Die Dicke, Lochdurchmesser und Lochabstände der keramischen GEM sind dabei bedeutend größer als die der CERN GEM, außerdem unterscheidet sich die Lochgeometrie. In den Abbildungen 2.1 und 2.2 kann man gut die unterschiedliche Geometrie und die Größenunterschiede zwischen den beiden Typen von GEM sehen.

Typ	CERN	Keramik
Isolator	Kapton	Glass – Aluminiumoxid Keramik
Dicke Isolator	55 μm	120 μm
Leitermaterial	Kupfer	Silber, Nickel, Gold
Lochmuster	hexagonal	hexagonal
Lochform	doppelt konisch	zylindrisch
Lochdurchmesser	70 μm max, 50 μm min	200 μm
Lochabstand	140 μm	400 μm

Tab. 2.1: Maße von CERN und keramischer GEM im Vergleich

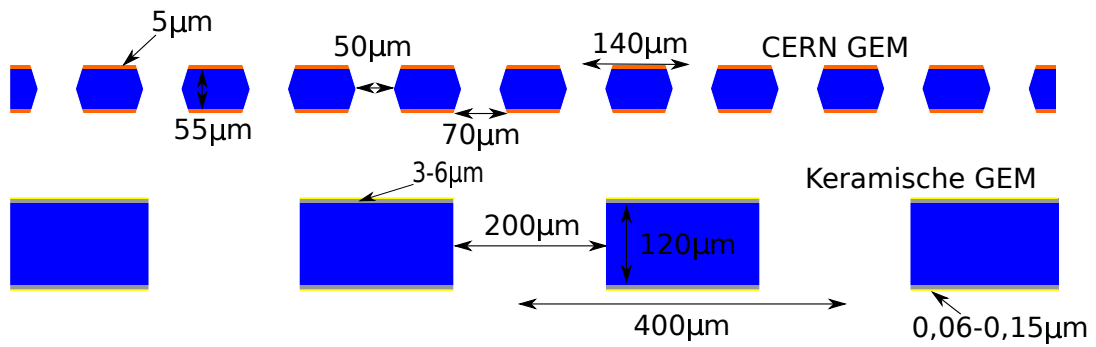


Abb. 2.1: Vergleich der Maße einer CERN GEM mit einer keramischen GEM, Schnittbild. Die Isolatorschicht ist in blau dargestellt, Nickel in grau und Kupfer in orange.

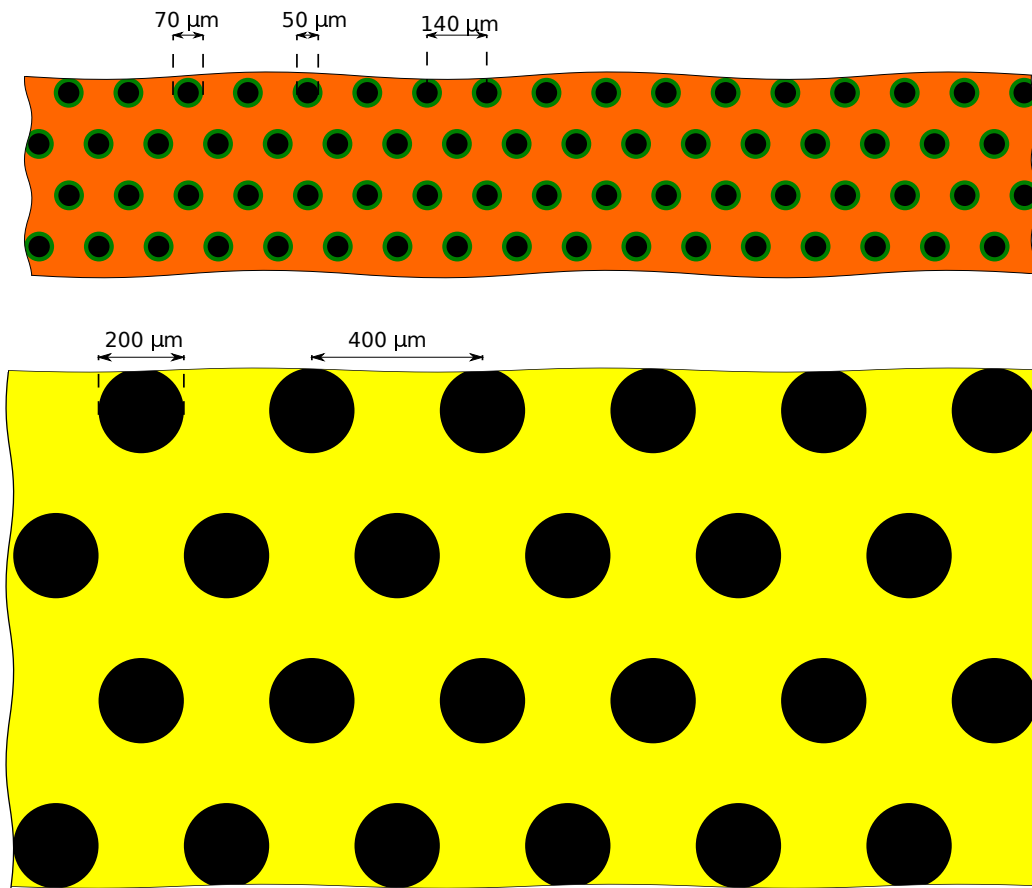


Abb. 2.2: Vergleich der Maße einer CERN GEM (oben) mit einer keramischen GEM (unten), Aufsicht. Schwarz sind durchgehende Löcher, Grün zeigt freiliegendes Kapton. Kupfer ist als orange und Gold als gelb dargestellt

2.1.4 Gründe für die Verwendung von Keramik

Die hohe Kapazität der GEM speichert bei den Betriebsspannungen der GEM viel Energie. Im Falle einer Entladung durch einen Funken innerhalb der GEM kann dies zu einer Erhitzung und damit Zersetzung und Verkohlung des Isolators führen. Damit verbunden sind erhöhte Leckströme und die Gefahr einer erneuten Entladung, die eine GEM beschädigen und unbrauchbar machen können. Da die Verstärkung allerdings exponentiell mit der Spannung steigt, ist es wünschenswert, die GEM möglichst nahe an der Maximalspannung zu betreiben. Die Verwendung von Keramik bringt dabei den Vorteil, dass sie hitzebeständiger ist und keine Neigung zum Verkohlen hat. Außerdem zeigt sie praktisch keine Wasseraufnahme und keine Ausgasung, was bei einem geschlossenen Gassystem oder längerer Lagerung vorteilhaft ist. Die produktionsbedingte, höhere Dicke der keramischen GEM bewirkt eine deutlich größere Betriebsspannung.

2.1.5 Konventionen

Hier werden die im Folgenden verwendeten Konventionen für die Nummerierung und Bezeichnung der Feldstärken und Spannungen genannt. Das Feld zwischen der Ausleseebene und der ersten GEM wird als Induktionsfeld bezeichnet. Die erste GEM, von der Anode gezählt, bekommt die Nummer 1, alle folgenden GEM werden aufsteigend nummeriert. Das Feld zwischen GEM 1 und GEM 2 wird als Transferfeld 1 bezeichnet, das zwischen GEM 2 und GEM 3 als Transferfeld 2. Diese Konventionen werden in Abbildung 2.3 dargestellt.

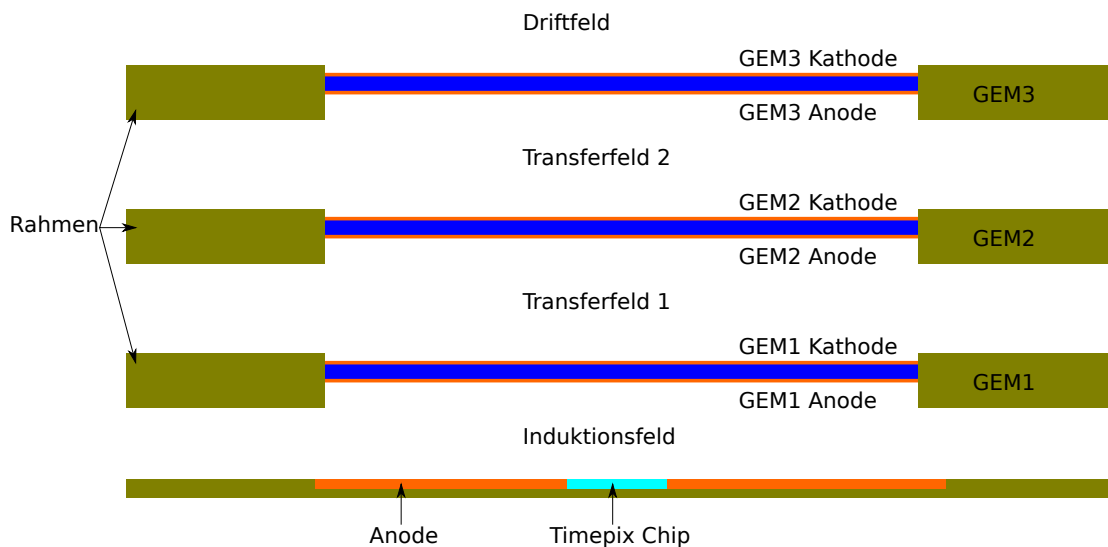


Abb. 2.3: Darstellung der Bezeichnungen der Komponenten

2.2 Testkammer

Die Testkammer befindet sich in einer Metallbox, die zur Abschirmung und als Halterung für die Steckverbinder dient. In der Box befindet sich zusätzlich der Vorverstärker. Die Anode der Testkammer besteht aus einem Printed Circuit Board (PCB) mit metallischen Pads auf einer Aluminiumgrundplatte. Die Pads haben dabei unterschiedliche Abmessungen, die in Abbildung 2.4 zusammen mit ihrer Nummer zur Identifikation gezeigt werden.

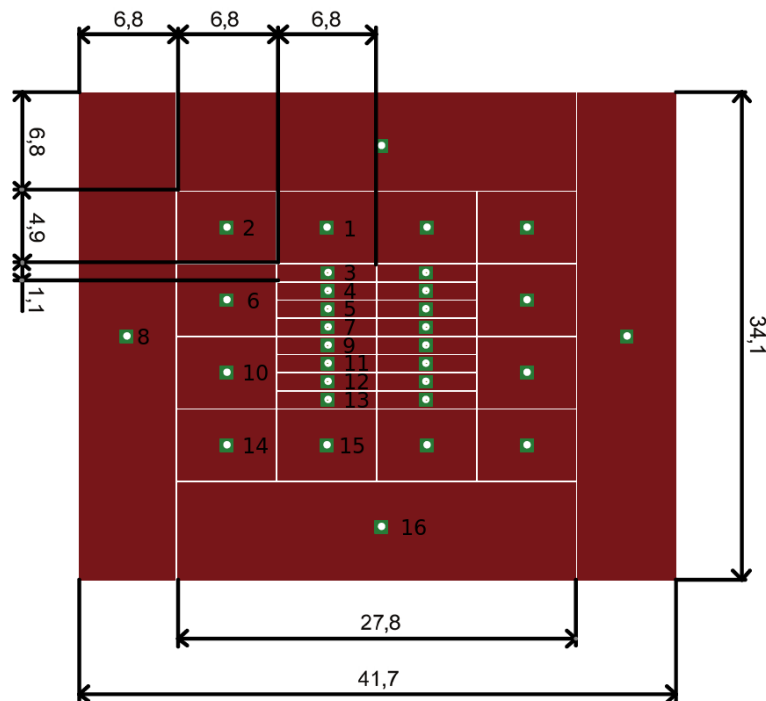


Abb. 2.4: Größe und Bezeichnung der Pads für die Testkammer. Die Nummerierung wurde nachträglich eingefügt, alle Maße in Millimetern [Dos]

Neben dem Bereich mit den Pads liegen die Öffnungen für die Gasversorgung und den Abfluß der Gasmischung. Die GEM mit ihrem Rahmen wird von vier Schrauben und Abstandshaltern in Position gehalten. Über der GEM liegt eine metallisierte Kunststoffolie als Kathode, die durch einen Rahmen mit Abstandshalter in Position gehalten wird. Die GEM und die Kathode werden durch Kabel mit dem PCB verbunden und durch Leiterbahnen mit den außen liegenden Anschlüssen für die Hochspannungskabel verbunden. Die ganze Kammer wird durch einen Aluminiumdeckel abgeschlossen, der mit vier Schrauben mit der Grundplatte verbunden wird und die Kammer durch eine Neoprendichtung abdichtet. Die Oberseite des Deckels beinhaltet ein Fenster aus Kapton für ionisierende Strahlung, außerdem befinden sich am Deckel mehrere Schrauben für das Verbinden der Erdungskabel der

Hochspannungsquellen, der ungenutzten Pads und des Vorverstärkers mit Masse. Die Hochspannungsquellen befinden sich zusammen mit dem Hauptverstärker in einen gemeinsamen Einschubgehäuse im NIM-Standard.

2.2.1 Auslese und Verstärkung

Die Testkammer hat 32 Auslesepads, von denen jeweils 16 mit einem Steckverbinder auf einen ladungssensitiven Vorverstärker mit 16 Kanälen liegen. Das Signal eines Kanals des Vorverstärkers wird im Spektroskopieverstärker verstärkt und geformt, so dass ein gaußförmiger Puls für das Oszilloskop und den Multi Channel Analyzer (MCA) erzeugt wird. Die Ausgänge der ungenutzten Kanäle werden von Steckverbindern mit $50\ \Omega$ abgeschlossen.

2.2.2 Signalerzeugung

Das Signal zur Kalibrierung der GEM wird durch Ionisation mit einer Fe-55 Quelle erzeugt. Diese Quelle erzeugt nach einem Elektroneneinfang monochromatische Röntgenphotonen mit $E = 5,9\ \text{keV}$, die ihre Energie in dem Gasvolumen der Testkammer deponieren. Die im Driftvolumen erzeugten Ladungsträger werden durch die GEM verstärkt und auf den Pads deponiert.

Zur Kalibrierung der Verstärkerkette wird ein Signalgenerator und ein Hochpass genutzt, um bekannte Ladungsmengen in die Verstärkerkette zu injizieren. Der Schaltplan hierfür ist in Abbildung 2.5 gezeigt.

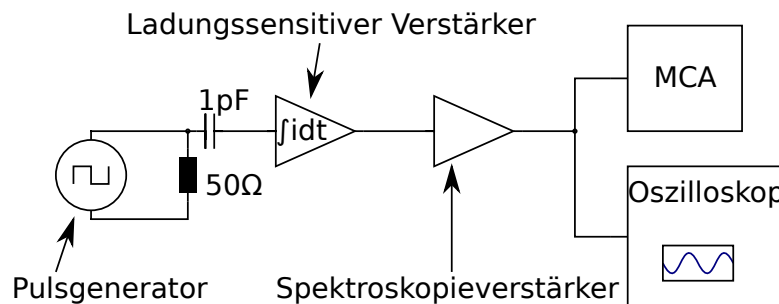


Abb. 2.5: Schaltplan für die Kalibrierung der Verstärker der Testkammer

2.3 Zeitprojektionskammer

Der Prototyp für eine Zeitprojektionskammer ist ein Zylinder mit $120\ \text{mm}$ Radius und $500\ \text{mm}$ Länge. Die innerste Schicht ist der Feldkäfig, der aus Kupferstreifen auf Kapton besteht. Mehrere Lagen Epoxidharz, Honeycombgewebe und Glasfasergewebe geben der Kammer ihre

mechanische Stabilität. Die konsequente Verwendung von Kompositmaterialien und Leichtbau entspricht dabei der geplanten TPC des ILD, welche ebenfalls konsequent im Leichtbau ausgeführt werden soll. Das Innere der Kammer teilt sich in drei Teilbereiche, die im Folgendem genauer beschrieben werden. Der erste Teilbereich ist der Zwischenraum zwischen der Kathode und dem Deckel, gefolgt vom Driftvolumen und dem zweiten Deckel mit den GEMs und der Signalauslese.

2.3.1 Deckel mit Kathode

Ein Deckel beinhaltet die Kathode mit ihren Abstandshaltern, dem Anschluss an die Hochspannung und die Abflüsse für das Gasgemisch. Die Kathode ist mit einem Ring aus Metallgewebe mit dem ersten Feldstreifen des Driftvolumens verbunden. Ein Dichtring und die Verschraubungen stellen eine gasdichte Verbindung des Deckels mit der Kammer sicher.

2.3.2 Driftvolumen

Der Feldkäfig besteht aus parallelen Kupferstreifen auf einer Kaptonschicht, die über Widerstände einen Spannungsteiler bilden und das Feld im Inneren der Kammer homogen halten. Außerdem sind drei Paare von Öffnungen aus Acetal in der Wand der Kammer eingelassen, in die Fenster eingeschraubt werden können um Laser oder Betastrahlung in das Driftvolumen einzustrahlen. Die ursprüngliche Konfiguration hatte ein 390 mm langes Driftvolumen, welches später durch eine Verschiebung der Kathode auf 290 mm verkürzt wurde. Damit ist das letzte Fenster nicht mehr nutzbar.

2.3.3 Deckel mit Auslesesystem

Der Deckel, der die Anode trägt, besteht aus mehreren Teilen. Ein äußerer Ring beinhaltet die Durchführungen für die Zufuhr des Gasgemisches und die Hochspannungskabel. In diesem ist ein quadratischer Einsatz mit 140 mm Seitenlänge eingeschraubt, welcher in der Mitte eine Zone mit verringerter Dicke und einem zentralen, rechteckigen Loch für den Timepix Chip hat, um diesen bündig mit der Oberfläche zu positionieren. Diese Platte ist auf der Innenseite mit einer kupferbeschichteten Kaptonfolie als Anode überzogen, deren Anschluss auf die Aussenseite geführt wird und mit Masse verbunden ist. Von Aussen ist außerdem ein Rahmen mit sechs eingeklebten Schrauben aufgeklebt. Dieser stellt die korrekte Positionierung des Chips und seiner Trägerplatine sicher. Die drei GEMs werden durch vier Schrauben am Einsatz befestigt, wobei auf den Schrauben sitzende Unterlegscheiben den korrekten Abstand sicherstellen. Dieser Aufbau wird zum Driftvolumen durch eine kupferbeschichtete Zwischenplatte abgeschlossen, welche durch 8 Schrauben am Deckel befestigt wird. Diese steht, wie die Kathode, mit dem Ende des Feldkäfigs durch ein Metallgewebe

in elektrischem Kontakt und ist der Punkt, an dem die Spannung am Ende des Feldkäfigs gemessen wird. Vor den GEMs hat diese Platte ein quadratisches Loch mit 5 cm Seitenlänge. Die gesamte Anordnung ist in Abbildung 2.6 schematisch dargestellt. Die drei hintereinander angeordneten GEMs werden über jeweils zwei Hochspannungskabel versorgt, so dass die Spannung für Anode und Kathode jeder GEM unabhängig voneinander eingestellt werden kann. Hinter dem Deckel führen isolierte Drähte von den Lötunkten der GEM zu den Hochspannungskabeln. Alle Lötunkte sind mit Kaptonband abgedeckt und die Seite, auf der die Anschlusspunkte liegen, wechselt. Die GEMs sind, wie bereits in Abschnitt 2.1.5 beschrieben und Abbildung 2.6 gezeigt, nummeriert. Die Kunststoffschrauben, welche die GEMs halten, gehen durch die GEM Träger und werden auf der Außenseite des Deckels von Muttern gehalten.

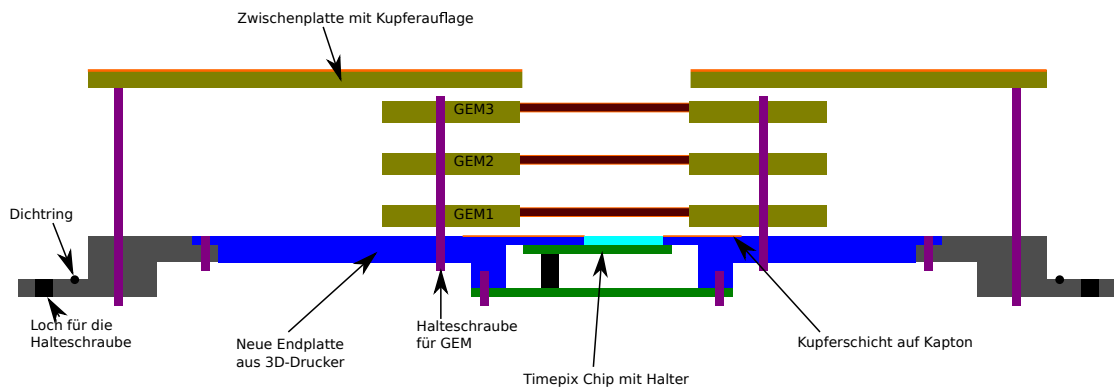


Abb. 2.6: Anordnung der GEMs und Aufbau der Endkappe mit Kupferschichten in orange. Kabel sind nicht dargestellt

2.3.4 Hochspannungsversorgung

Die Hochspannungen für die TPC werden von vier Hochspannungsquellen erzeugt. Jeweils eine der drei Hochspannungsquellen mit 4 kV Maximalspannung und zwei Ausgängen versorgt eine GEM, während eine Hochspannungsquelle mit zwei Ausgängen und 8 kV Maximalspannung die Kathode versorgt. Der zweite Ausgang dieser Hochspannungsquelle bleibt ungenutzt. In jedem Stromkreis befindet sich ein Amperemeter für die Überwachung der Ströme und das Auslösen der automatischen Abschaltung bei Überschreiten der Maximalströme. In den Stromkreisen für die GEM sitzt dieses Amperemeter direkt nach der Hochspannungsquelle. Hochohmige Widerstände zwischen dem Amperemeter und dem GEM beschränken zusätzlich den Maximalstrom, wie in Abbildung 4.1 zu erkennen. Alle Hochspannungsquellen und Amperemeter werden über USB an einen Computer angeschlossen, auf dem ein Labview Programm alle Komponenten überwacht und steuert. Dieses Programm steuert außerdem das langsame Verändern der Spannungen zur Vermeidung von Überspan-

nungen. Das Abschalten bei Überschreiten der Maximalströme wird durch eine Ringleitung erreicht, die alle Hochspannungsquellen mit den Amperemetern verbindet und das Inhibit-Signal an alle Komponenten weiterleitet. Die Spannungsversorgung für die Kathode unterscheidet sich von der Versorgung der GEM und wird in Abbildung 2.7 dargestellt. Die zugehörige Spannungsquelle ist ohne zusätzliche Widerstände direkt mit der Kathode verbunden. Diese ist über einen Ring aus leitfähigen Gewebe mit dem Anfang des Feldkäfigs verbunden. Ein Teil der Hochspannung fällt an den Widerständen des Feldkäfigs ab und erzeugt so ein homogenes Driftfeld. Die Restspannung wird dann an der Zwischenplatte abgegriffen und von dort über ein Amperemeter zu einem Spannungsteiler geleitet. Die Position des Amperemeters nach der Kammer und vor dem Spannungsteiler ergibt sich aus der maximalen Betriebsspannung des Amperemeters von 5 kV. Am Spannungsteiler befindet sich ein Abgriff für die Messung der Spannung an der Zwischenplatte, welche durch das Teilungsverhältnis im Niederspannungsbereich liegt und von einem Voltmeter angezeigt wird. Der Ausgang des Spannungsteilers liegt zusammen mit den Abschirmungen aller Kabel auf einer zentralen Masseschiene, welche über den Schutzleiter der Stromnetzes geerdet ist. Der Spannungsteiler und das Hochspannungssystem werden in Kapitel 4.1 genauer betrachtet,

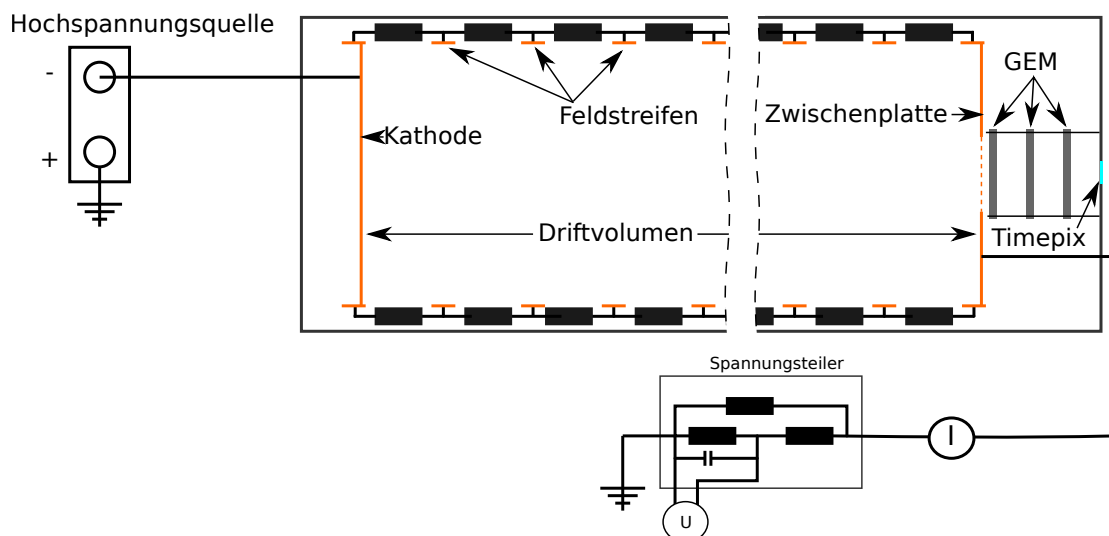


Abb. 2.7: Stromkreis für die Versorgung der Kathode

2.3.5 Signalerzeugung

Die TPC kann Signale unterschiedlicher Quellen messen. Immer präsent sind kosmische Myonen aus Luftschauern und natürlich vorkommende ionisierende Strahlung. Die Testsignale für die TPC werden normalerweise entweder mit einem Ultraviolett-Laser oder einer Strontium-90 Quelle erzeugt. Alternativ kann eine Röntgenquelle verwendet werden, bei

der die Röntgenfluoreszenz verschiedener Elemente genutzt wird. Eisen-55 hat zu wenig Energie und kann dadurch die Wand der TPC praktisch nicht durchdringen, weshalb eine Röntgenfluoreszenzquelle verwendet wird.

2.3.6 Auslese mit Pads

Für die TPC existiert ebenfalls die Möglichkeit der Auslese mit Pads. Diese wird zur Funktionsprüfung der TPC verwendet und ersetzt dabei den Timepix Chip und seinen Halter. Die vier Ausleseflächen bestehen aus kupferbeschichteten Kapton und sind über Drähte mit vier Lemo-Buchsen verbunden. Jeweils ein Pad kann mit einem ladungssensitiven Verstärker verbunden werden, während die restlichen Pads über 50Ω Widerstände mit Masse verbunden werden. Das Signal kann dann wie bei der Testkammer weiter verstärkt oder auf dem Oszilloskop betrachtet werden.

2.3.7 Auslese mit Timepix Chip

Nach der Verstärkung durch die GEMs treffen die Elektronen auf den Timepix Chip. Dieser wandelt die deponierte Ladung in digitale Signale um, welche über eine Field-programmable Gate Array (FPGA) Karte ausgelesen werden. Der Timepix Chip ist direkt mit einem PCB durch Lötunkte verbunden und mit einem Steckverbinder mit 36 Pins auf einer Platine aufgesteckt. Die Verbindung zur FPGA-Karte erfolgt über ein VHDCI und das Intermediate Board (IMB) welches durch einen Steckverbinder mit der FPGA-Karte vom Typ Xilinx ML-605 verbunden ist. Von dieser erfolgt die Datenübertragung durch ein RJ-45 Netzkabel zu einem Computer, auf dem die Auslese und Steuersoftware TOS für den Timepix Chip läuft. Das IMB stellt außerdem die Verbindung zwischen dem Timepix Chip und seinem Netzteil her. Die Firmware für den Timepix Chip wird von einem zweiten Computer mit Hilfe der von Xilinx bereitgestellten Software Impact über ein USB Kabel auf die FPGA Karte übertragen. Die Software für die Auslese und Steuerung des Timepix Chips wird als TOS V6.2.1 bezeichnet, die Firmware ist TOF 2.2.3. Details über dieses Auslesesystem sind in der Dokumentation zu finden [KL].

2.4 Gemeinsame Systeme

Die beiden Driftkammern teilen sich einige Versorgungssysteme. Dabei handelt es sich um die Überwachung der Parameter Druck und Temperatur benutzten Sensoren, sowie die Überwachung der Gasqualität und die Bereitstellung des Gasgemisches.

2.4.1 Gassystem

Das Gassystem besteht aus den Systemen für das Erzeugen der Gasmischung, dem Leitungs- und Ventilsystem zur Zuführung zu den Kammern und einem Gasmonitor zum Überwachen der Eigenschaften der Gasmischung. Alle Ausgänge des Gassystems sind mit einem eigenen, mit Glycerin gefüllten, Bubbler gegen das Eindringen von Luft verschlossen. Eine ausführlichere Dokumentation des Aufbaus und der Entwicklung des Gassystems kann in [Gau08, Kapitel 3.3] gefunden werden.

Erzeugung der Gasmischung

Die beiden Kammern werden mit einem Gemisch aus Argon und Kohlenstoffdioxid versorgt. Die Gase werden in 50 l Druckgasflaschen gelagert und durch einen Druckminderer mit 2 Bar Druck an einen Massendurchflussmesser abgegeben. Dort wird der Gasfluss geregelt, so dass die benötigte Gasmischung erzeugt wird. Die Kammern und der Gasmonitor können über ein System aus Ventilen wahlweise mit der Gasmischung, Trockenluft oder einer fertigen Gasmischung aus einer Gasflasche versorgt werden. Dabei ist es möglich, die Gasmischung vor dem Eintritt oder nach dem Austritt aus den Kammern in den Gasmonitor zu leiten. Die Eigenschaften der Gasmischung sind dabei über längere Zeit stabil, wie am Gassystem durchgeführte Messungen gezeigt haben [Ped].

Überwachung der Gasmischung

Der Gasmonitor basiert auf einem Zählrohr, das von dem Gasgemisch durchströmt wird. Eine fest eingebaute Eisen-55 Quelle erzeugt durch Ionisation eine definierte Ladungsmenge, die durch die Gasverstärkung weiter verstärkt wird. Dabei ist die Gasverstärkung von der Gasmischung abhängig und aus den Unterschieden in der Pulshöhe zwischen dem frischen Gemisch und dem Gasgemisch aus dem Auslass der Kammer kann man erkennen, wie weit der Spülvorgang zum Verdrängen der Luft in der Kammer abgeschlossen ist. Eventuell noch vorhandene Luft und Verunreinigungen bewirken eine verringerte Pulshöhe.

Der Einfluss von Druck und Temperatur auf das Gasgemisch wird separat überwacht.

2.4.2 Wetterstation

Da die Verstärkung der GEM abhängig von der Dichte des Gases ist müssen Temperatur und Druck im Labor kontinuierlich aufgezeichnet werden. Dazu wird ein Temperatursensor und ein Drucksensor mit einem Analog-Digital Wandler über ein LabView Programm ausgelesen und aufgezeichnet. Dieses System wird als Wetterstation bezeichnet. Zusätzlich ist es möglich, die von der Wetterstation der Universität aufgezeichneten Daten zu erhalten und bei

der Testkammer die Temperatur direkt am Kaptonfenster mit einem Temperaturfühler und einem Multimeter zu messen.

Messungen mit der Testkammer

In diesem Kapitel wird die Kalibrierung und die Messungen an der Testkammer beschrieben. Die Messreihen an der Testkammer befassen sich mit der Frage nach der Verstärkung in Abhängigkeit von der Spannung über die GEM und die Stabilität der Verstärkung über längere Zeiträume.

Das Funktionsprinzip der Messung ist der Vergleich der Ladung vor und nach der Verstärkung durch die GEM. Dabei wird die ursprüngliche Ladungsmenge aus der Ionisationsenergie des Gasgemisches und der Photonenenergie der radioaktiven Quelle (Fe-55) bestimmt und die Ladung nach der Verstärkung durch die Pulshöhe am MCA nach der Verstärkung durch den ladungssensitiven Verstärker und den Spektroskopieverstärker. Hierfür muss der Zusammenhang zwischen der Ladungsmenge auf dem Eingang der Verstärkerkette und der Pulshöhe bestimmt werden. Dies wird durch die zuvor ausgeführte Kalibrierung erreicht. Abhängig von der Art der Messung wird entweder die Spannung über die GEM verändert oder die Verstärkung der GEM bei konstanter Spannung über längere Zeiträume beobachtet.

3.1 Kalibrierung

Für die Kalibrierung der Verstärkerkette wurde ein Rechtecksignal mit $100 \mu\text{s}$ Pulslänge und $2\text{--}5 \text{ kHz}$ Wiederholungsrate verwendet. Das Signal steigt dabei innerhalb von 5 ns von 0 V auf die eingestellte Spannung an. Bei diesen Frequenzen tritt keine Überlappung der einzelnen Pulse auf. Das Testsignal wird über ein LEMO-Kabel mit einem Hochpass aus einem 50Ω Widerstand und einer 1 pF Kapazität auf den betreffenden Eingang des Vorverstärkers gegeben. Das Signal am Ende der Verstärkerkette wird mit dem MCA aufgezeichnet und die Position des Peaks sowie die Pulshöhe werden notiert. Alle anderen Eingänge des Vorverstärkers werden dabei mit Masse verbunden und ihre Ausgänge mit 50Ω Lemo-Steckern abgeschlossen.

3.1.1 Messungen von Wechselwirkungen zwischen den Kanälen

In einer ersten Messreihe wurden alle Kanäle nacheinander mit 80 mV Rechteckpulsen getestet. Es wurde nach Fehlern und gegenseitigen Beeinflussungen zwischen den Kanälen gesucht, da der Vorverstärker zu viel Rauschen zeigte. Die Messergebnisse sind in Tabelle 3.1 dargestellt.

Dabei wurde auf einen Eingang das Signal gegeben und nacheinander für alle Ausgänge die Differenz zwischen Maximal und Minimalspannung mit dem Oszilloskop bestimmt.

Kanal	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
0	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,03	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01
1	10,6	0,2	0,25	0,22	0,25	0,22	0,26	0,24	0,26	0,28	0,26	0,24
2	0,2	9,4	0,24	0,24	0,28	0,22	0,28	0,26	0,26	0,28	0,6	0,26
3	0,2	0,2	10,0	0,24	0,28	0,18	0,28	0,24	0,24	0,24	0,28	0,60
4	0,28	0,30	0,35	9,7	0,40	0,30	0,36	0,34	0,34	0,34	0,40	0,40
5	0,34	0,34	0,38	0,36	10,6	0,34	0,34	0,32	0,28	0,35	0,34	0,34
6	0,25	0,23	0,30	0,26	0,32	8,6	0,34	0,30	0,32	0,32	0,34	0,36
7	0,80	0,66	0,90	0,75	0,85	0,60	10,0	0,70	0,68	0,74	0,75	0,80
8	11,4	11,4	11,4	11,4	11,4	11,4	0,45	11,4	11,4	11,4	11,4	11,4
9	0,35	0,35	0,38	0,12	0,38	0,33	0,50	0,33	0,60	0,40	0,42	0,40
10	0,04	0,20	0,25	0,24	0,24	0,22	0,28	0,24	0,25	9,6	0,27	0,27
11	0,25	0,05	0,32	0,30	0,32	0,08	0,33	0,31	0,32	0,32	9,3	0,32
12	0,17	0,25	0,06	0,30	0,06	0,25	0,32	0,28	0,30	0,30	0,34	9,8
13	0,28	0,28	0,45	0,06	0,40	0,05	0,43	0,05	0,43	0,40	0,43	0,46
14	0,31	0,28	0,34	0,35	0,06	0,27	0,36	0,34	0,32	0,33	0,35	0,36
15	0,11	0,12	0,15	0,15	0,17	0,04	0,20	0,05	0,19	0,20	0,21	0,20
16	0,05	0,05	0,08	0,09	0,11	0,10	0,03	0,05	0,11	0,12	0,14	0,13

Tab. 3.1: Messung des Ausgangssignals des Vorverstärkers. Die Zeile entspricht dem getesteten Eingang, die Spalte dem Signal nach der Verstärkung. Die Fehler in Kanal 8 und 9 sind deutlich zu erkennen. Alle Spannungen sind in Volt angegeben, in Zeile 0 ist das Rauschen mit allen Eingängen auf Masse angegeben

Diese Messreihe zeigte ein Problem mit Kanal Nummer 8, bei dem ein Signal auf den Eingang des Verstärkers in allen anderen Kanälen Pulse mit der 11 V Höhe erzeugte, während der Ausgang von Kanal 8 nur rund 600 mV lieferte. Kanal 9 zeigte ebenfalls abweichendes Verhalten, mit etwas erhöhten Rauschen und sehr geringen Signal. Dieses Verhalten wird bei der Erstellung der Kalibrierung noch angesprochen. Der defekte Kanal 8 wurde mit einem Kabel mit der Masse des Verstärkers verbunden und in den folgenden Messungen übersprun-

gen. Eine erneute Messung des Rauschens aller Kanäle zeigte, dass sich die Ergebnisse für alle Kanäle ähneln.

3.1.2 Erzeugen der Kalibrierungsgraden

In der eigentlichen Kalibrierung werden, wie bereits angesprochen, verschiedene Pulshöhen mit 2–5 kHz Frequenz auf den zu kalibrierenden Kanal des Vorverstärker gegeben und nach der Verstärkung vom MCA aufgezeichnet. Die Position des Peaks wird durch das Fitten einer Gauß-Normalverteilung bestimmt und gegen die Pulshöhe des Signalgenerators aufgetragen. Es ergibt sich ein linearer Zusammenhang. Durch die bekannte Spannung und Kapazität kann die Steigung der linearen Regression von $\frac{\text{MCA-Kanal}}{\text{V}}$ in $\frac{\text{MCA-Kanal}}{\text{Elektronen}}$ umgerechnet werden.

Bei der Kalibrierung wurde ein fine gain von 1, 18 und ein coarse gain von 50 genutzt. Das Signal wurde mit einer 0,5 μs shaping time in gaußförmige Pulse geformt. Der Hauptverstärker kompensierte pole zero automatisch, um das Unterschwingen nach einem Puls zu unterdrücken, und nutzte unipolaren Input und normalen Output. Durch die zwei Pulse des Vorverstärkers, die durch die steigende und fallende Flanke eines Rechteckpulses entstehen, ergeben sich zwei Peaks im Spektrum des MCA. Der relevante Peak ist der in den höheren MCA Kanälen, da dieser der Injektion von negativer Ladung entspricht, was in der Messung dem Auftreffen von Elektronen auf das Pad entspricht. Die Spannung wurde für die Kalibrierung in 5 mV Schritten von 10 mV beginnend erhöht und die Peakposition bestimmt, bis eine Peakposition von über 7000 erreicht wurde. Dies war bei Spannungen zwischen 55 mV und 65 mV der Fall. Der Pulsgenerator erzeugte dabei Pulse mit 2–5 kHz Frequenz und 100 μs Länge ohne Gleichspannung (Offset). Die Messreihen für alle Kanäle sind in Abbildung 3.1 im Vergleich dargestellt. Dabei kann man erkennen, dass Kanal 1 nach Kanal 5 die höchste Steigung hat. Da er zudem, wie aus der Belegung der Pads in Abbildung 2.4 ersichtlich, an ein mittelgroßes Pad angeschlossen ist und, wie in Tabelle 3.1 erkennbar, kein übermäßiges Rauschen zeigt, wurde für alle folgenden Messungen Kanal 1 verwendet. Die lineare Regression für Kanal 1 ist in Abbildung 3.2 dargestellt und lieferte eine Steigung von $m = (129,63 \pm 0,19) \frac{\text{MCA-Kanal}}{\text{mV}}$.

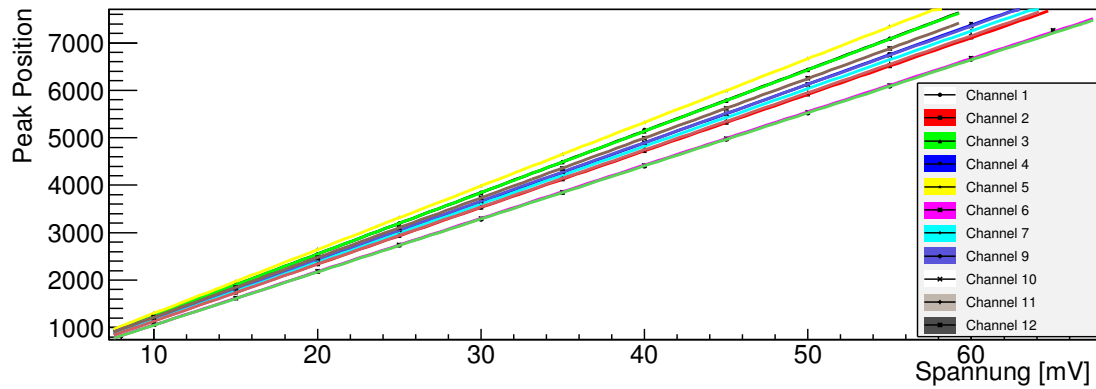


Abb. 3.1: Vergleich der Kalibrierungsgraden für alle nutzbaren Kanäle

Ergebnisse für Kanal 1

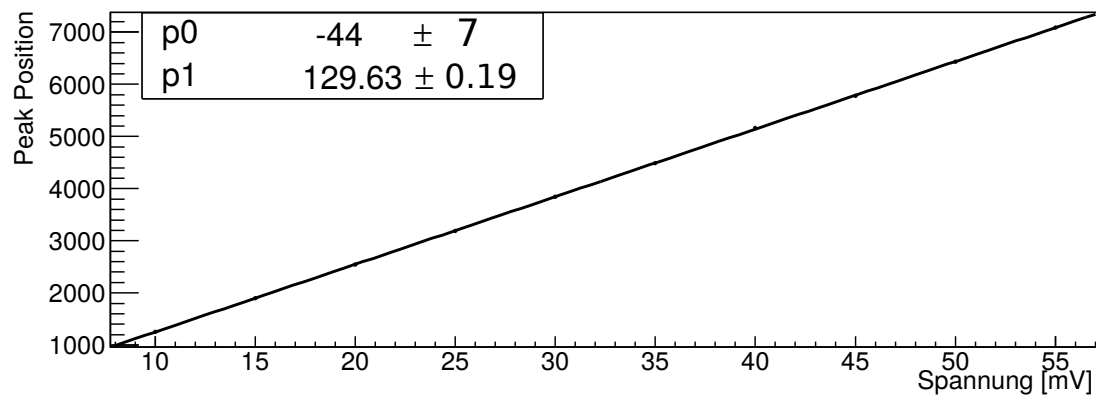


Abb. 3.2: Lineare Regression für die Bestimmung der Verstärkung von Kanal 1

3.2 Messungen der Verstärkung der GEM

Im nächsten Schritt wird eine GEM in die Testkammer eingebaut und die Kathode über der GEM plziert. Der Abstand zu den Pads betrug 2 mm und der Abstand zur Kathode 5,5 mm. Alle elektrischen Verbindungen wurden nach dem Einbau der GEM und vor dem Schließen der Testkammer getestet. Vor Beginn der Messung wurde mindestens eine Stunde lang die Kammer mit der Gasmischung gespült, um die Luft aus dem Inneren vollständig mit der Gasmischung zu verdrängen.

Die Feldstärken wurden bei den Messungen auf $300 \frac{\text{V}}{\text{mm}}$ für das Induktionsfeld und $50 \frac{\text{V}}{\text{mm}}$ für das Driftfeld eingestellt. Es wurde die Peakposition der Absorptionspeaks der 800 MBq Eisenquelle bei einem coarse gain von 200 gemessen, was sich bei der Berechnung der Verstärkung der GEM als Multiplikation mit vier niederschlägt.

3.2.1 Berechnungsverfahren für die Verstärkung

Die Verstärkung einer GEM wird in zwei Schritten berechnet. Im ersten Schritt wird aus der Ionisationsenergie der Gase, deren Anteil am Gasgemisch und der Photonenenergie berechnet, wie viele Elektronen ein Photon freisetzen kann. Der zweite Schritt besteht darin, die Ladung nach der Verstärkung durch die GEM zu bestimmen und damit der Verhältnis $G = \frac{N_{\text{Nach GEM}}}{N_{\text{Vor GEM}}}$ zu bilden. Die Ionisationsenergien und Anteile von Argon und Kohlenstoffdioxid sind, ebenso wie die Energie der Photonen von Eisen-55, bereits aus den Kapiteln 1.3.4 und 2.2.1 bekannt. Man erhält damit pro absorbierten Photon 383 Elektronen, gemäß der Berechnung in Gleichung 3.1.

$$N_e = \frac{5,9 \text{ keV}}{0,8 * 15,78 \text{ eV} + 0,2 * 13,81 \text{ eV}} \approx 383 \quad (3.1)$$

Die Anzahl der Elektronen nach der Verstärkung kann mit der Kalibrierungsgraden aus dem vorherigen Abschnitt und Kenntnis der Kapazität des Hochpasses berechnet werden. Dazu muss eine Relation zwischen der Spannung und der Ladung auf dem Kondensator hergestellt werden. Mit der bekannten Kapazität von $C = 1 \text{ pF} = 10^{-12} \text{ F}$, dem Fehler auf die Kapazität von 2% und der Elementarladung von $e = 1,602 * 10^{-19} \text{ C}$ erhält man als Umrechnungsfaktor $\frac{C}{e} = 6,242 * 10^3 \frac{\text{e}}{\text{V}}$ für die Anzahl der Elektronen. Der Fehler auf diese Kalibrierung wird mit der Gaußschen Fehlerfortpflanzung berechnet, gemäß Gleichung 3.2.

$$\sigma_{\tilde{m}} = e \sqrt{\frac{\sigma_m^2}{C^2} + \frac{(\sigma_C * m)^2}{C^4}} \quad (3.2)$$

Aus der Kalibrierungsgraden für Kanal 1 erhält man $\tilde{m} = (208 \pm 4) * 10^{-4} \frac{\text{MCA-Kanal}}{\text{Elektronen}}$, was einem relativen Fehler von 1.9 % entspricht. Damit ist eine Berechnung der Verstärkung aus der Peakposition möglich. Der Fehler auf die Verstärkung wird ebenfalls gemäß der Fehlerfortpflanzung berechnet, die Formel ist in Gleichung 3.3 angegeben, wobei \tilde{m} die Steigung der linearen Regression bezeichnet und x_{Peak} die Position des Peaks im Spektrum des MCA.

$$\sigma_{\text{Gain}} = \sqrt{(\tilde{m} * \sigma_x)^2 + (\sigma_{\tilde{m}} * x_{\text{Peak}})^2} \quad (3.3)$$

Die Halbwertsbreite (FWHM) in Relation zur Peakposition angegeben wird, um eine Abschätzung der Energieauflösung zu erhalten. Für die Fehlerfortpflanzung wird Gleichung 3.4 benutzt, offensichtlich hängt der Fehler nur von der Qualität des Fits für den betreffenden Peak ab. Dabei ist Y das FWHM des Peaks.

$$\sigma_{\text{rel FWHM}} = \sqrt{\frac{Y^2 \sigma_X^2}{X^4} + \frac{\sigma_Y^2}{X^2}} \quad (3.4)$$

3.3 Abhängigkeit der Verstärkung der CERN GEM von der Spannung

Es wurde eine CERN GEM mit den oben genannten Abständen in die Testkammer eingebaut und für etwa eine Stunde mit dem Gasgemisch gespült. Dann wurde die Spannung über die GEM variiert, während die Feldstärke des Drift und Transferfeldes konstant auf den bereits unter 3.2 genannten Werten gehalten wurden. Diese Messreihe ist in Abbildung 3.3 zu sehen, man erkennt gut den exponentiellen Verlauf der Verstärkung.

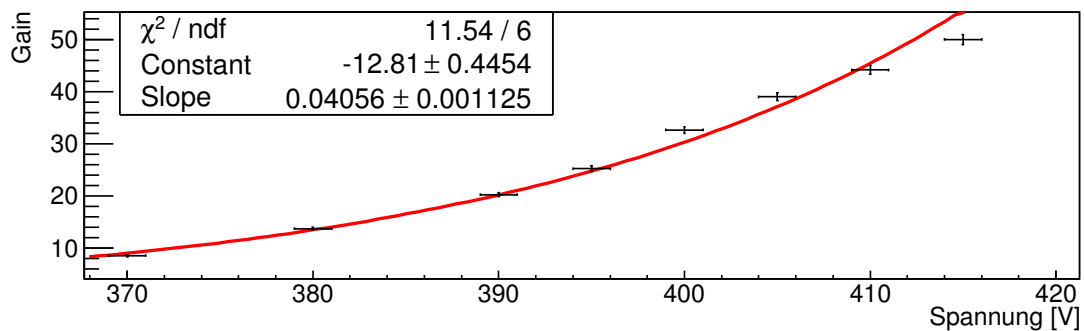


Abb. 3.3: Verstärkung der CERN GEM 20 am 02.09.2015. Der Fit ist eine Exponentialfunktion der Art $G(U) = e^{p_0 + p_1 \cdot U}$

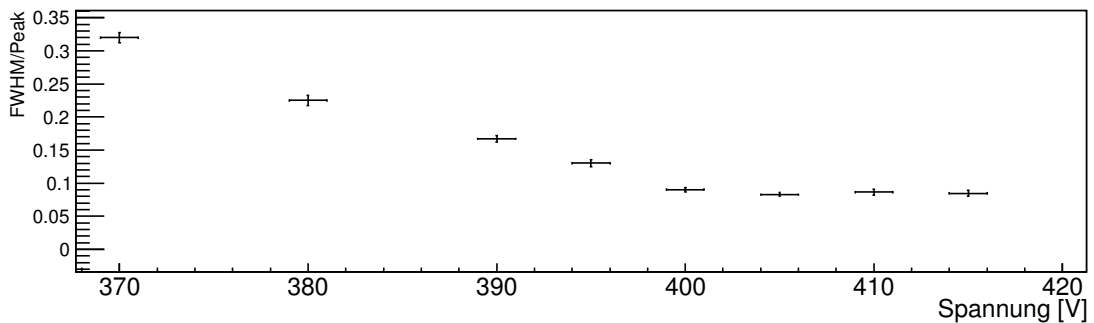


Abb. 3.4: Energieauflösung der CERN GEM 20 am 02.09.2015.

Die Verstärkung der GEM 20 wurde mit den Parametern $p_0 = -12.8 \pm 0.4$ und $p_1 = (0.0406 \pm 0.0011) \text{ V}^{-1}$ gefittet. Das Verhältnis zwischen FWHM und Position des Peaks hängt nur schwach von der Spannung ab und fällt mit steigender Spannung.

Eine weitere Messreihe wurde mit GEM 17 durchgeführt, wobei Abstände und Felder erneut die unter 3.2 angegebenen Werte hatten.

3.3 Abhängigkeit der Verstärkung der CERN GEM von der Spannung

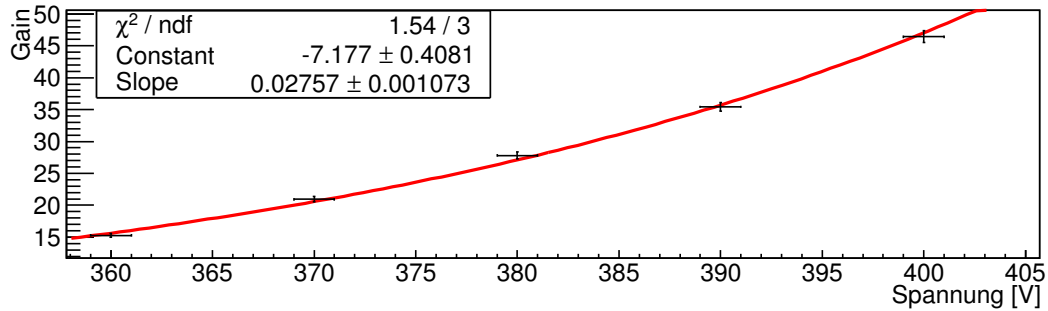


Abb. 3.5: Verstärkung der CERN GEM 17 am 25.08.2015. Der Fit ist eine Exponentialfunktion der Art $G(U) = e^{p_0 + p_1 \cdot U}$

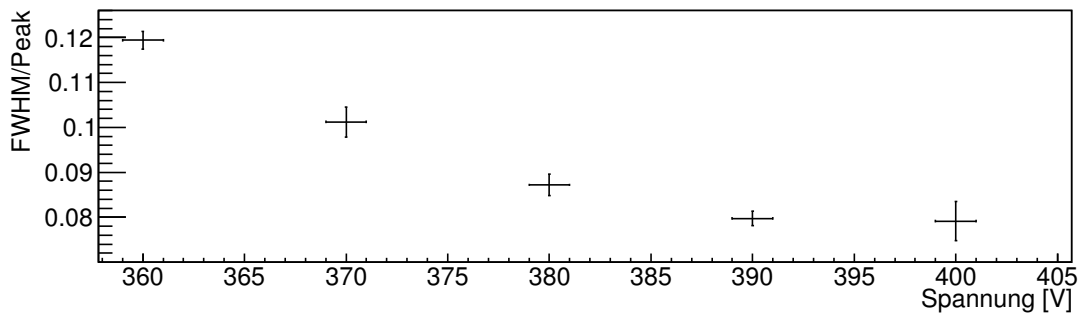


Abb. 3.6: Energieauflösung der CERN GEM 17 am 25.08.2015.

Auch hier zeigt sich in Abbildung 3.5 der exponentielle Zusammenhang zwischen Spannung und Verstärkung, in diesem Fall mit den Parametern $p_0 = (-7.2 \pm 0.4)$ und $p_1 = (0.0276 \pm 0.0011) \text{ V}^{-1}$. Dies ist eine deutliche Abweichung von dem Ergebnis von GEM 20. Die Energieauflösung in Abbildung 3.6 zeigt einen ähnlichen Verlauf wie die Messreihe für GEM 20, allerdings ist die Energieauflösung deutlich besser.

3.4 Messungen mit den keramischen GEM

Die keramische GEM mit Bezeichnung C2 wurde mit den gleichen Abständen wie die CERN GEM eingebaut und in mehreren Messreihen auf Verstärkung in Abhängigkeit von der Spannung und das Verhalten über längere Zeitspannen getestet. Anschließend wurde die Verstärkung von C 1 bis 700 V getestet.

3.4.1 Abhängigkeit der Verstärkung von der Zeit

Um die Stabilität der Verstärkung einer keramischen GEM über längere Zeiträume zu bestimmen wurde die GEM C 2 mit 610 V betrieben und alle 60 s für 60 s ein Spektrum aufgenommen. Diese Messreihe wurde mit einem anderem MCA aufgezeichnet und ist deshalb nicht kalibriert. Verstärkung und Breite werden deshalb in willkürlichen Einheiten (arbitrary units, a.u.) angegeben. Außerdem wurde die Verstärkung in diesem Fall verändert, auf ein coarse gain von 500, als Anpassung an den anderen MCA. Es wurden zwei Messreihen über mehrere Stunden durchgeführt, die in Abbildung 3.7 und 3.8 dargestellt sind. Da Einschalteteffekte der Verstärkerkette vermieden werden sollten, wurden sie mehrere Minuten vor dem Starten der Hochspannungsquellen eingeschaltet. Die Testkammer wurde seit mindestens 8 Stunden mit der Gasmischung gespült, wobei eine Spüldauer von 1 Stunde zum Erreichen des Gleichgewichtszustandes reicht. Für die in Abbildung 3.8 dargestellte Messreihe wurde für die gesamte Messdauer die Raumtemperatur und der Druck aufgezeichnet, und um Einflüsse der Temperatur besser erkennbar zu machen wurde nach etwa 13000 Sekunden die Temperatur im Raum mit einer Klimaanlage gesenkt. Dies führte zu Oszillationen um die eingestellte Temperatur von 18 °C, die in der Temperaturmessung in Abbildung 3.9 erkennbar sind. Da der Temperatursensor nicht kalibriert war, ist auch diese Messreihe in willkürlichen Einheiten. Es zeigt sich, dass kleine Temperaturänderungen bei diesem Versuchsaufbau kaum erkennbaren Einfluß auf die Messwerte haben.

Das wichtigste Resultat ist, dass die Verstärkung der GEM nach einer Zeitspanne zwischen 8 und 10 Minuten einbricht und sich dann auf einem neuen Wert stabilisiert. Dieses Verhalten zeigt sich in beiden Messreihen nach der gleichen Zeit. Der Wert für die Breite des Peaks braucht mit 30 Minuten länger als die Position des Peaks, um sich zu stabilisieren und zeigt auch nach dieser Zeit deutliche Schwankungen. Bei einer mittleren Peakposition von 215 und einem mittleren FWHM von 35 ergibt sich eine Energieauflösung von 16 %. Bei beiden Messungen traten bei einer Spannung von 610 Volt vereinzelt Überschläge in der GEM auf, die allerdings keine sichtbaren Effekte auf die Verstärkung oder das Aussehen der GEM hatten.

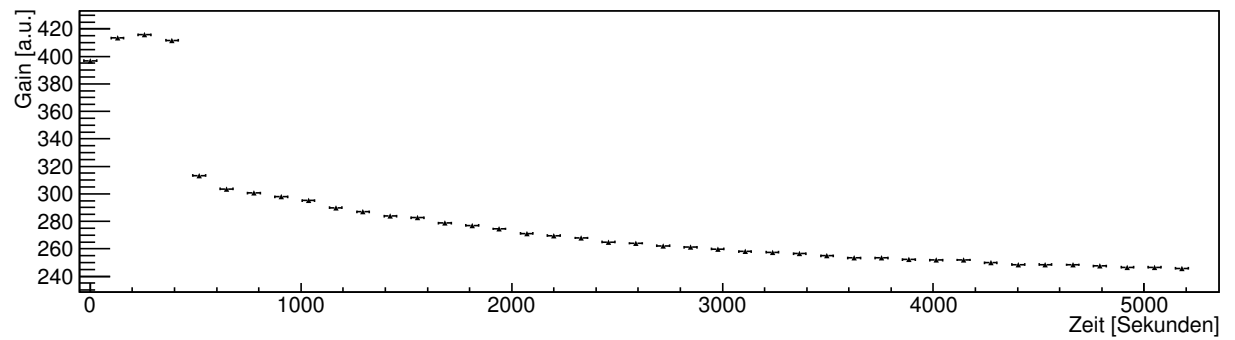


Abb. 3.7: Messung der keramischen GEM C 2 am 15.09.2015 bei 610 V, $50 \frac{\text{V}}{\text{mm}}$ Driftfeld und $300 \frac{\text{V}}{\text{mm}}$ Induktionsfeld. Der y-Wert ist die Peakposition. Der Fehler auf die Zeit beträgt 30 Sekunden und der Fehler auf die Peakposition stammt aus der Genauigkeit des Fits

3 Messungen mit der Testkammer

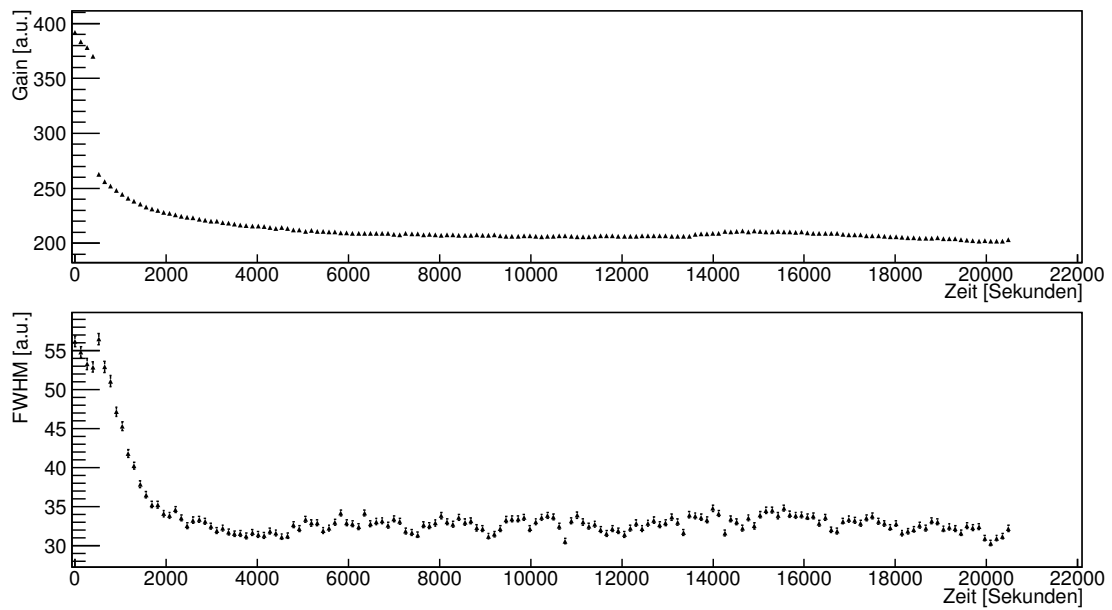


Abb. 3.8: Messung der Peakposition und des FWHM der keramischen GEM C 2 am 16.09.2015. Die Nullpunkte der Zeitachsen sind auf den Start der Messreihe bezogen, ab 13.000 Sekunden ist die Klimaanlage aktiv.

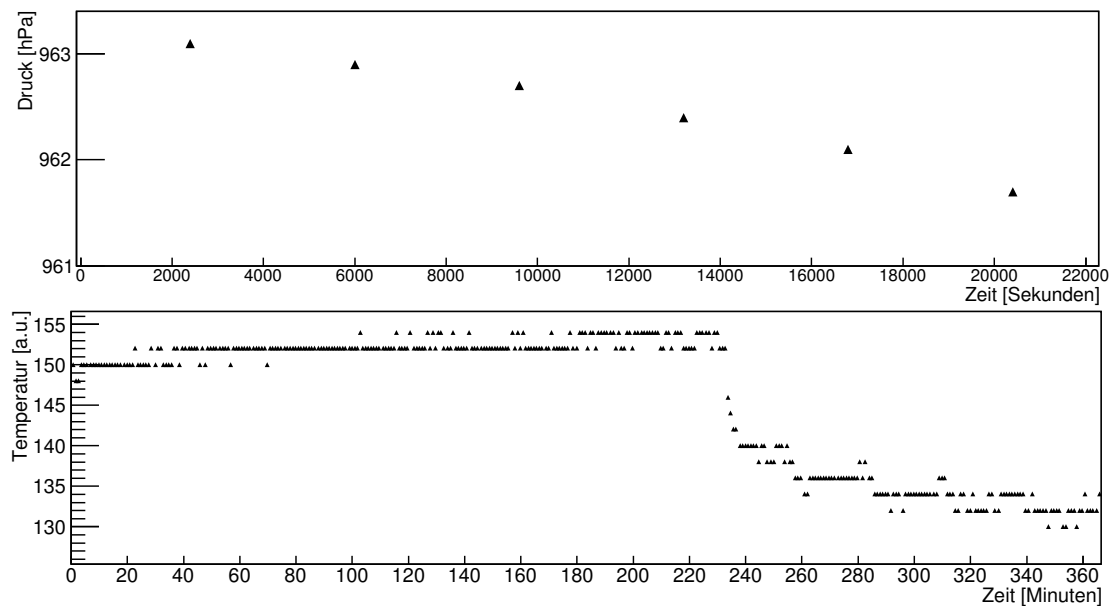


Abb. 3.9: Verlauf von Temperatur und Druck am 16.09.2015. Die Zeitachsen fallen mit den Zeitachsen in Abbildung 3.8 zusammen. Die Messreihe für die Temperatur ist in willkürlichen Einheiten, da der Sensor nicht kalibriert war.

3.4.2 Abhängigkeit der Verstärkung der keramischen GEM C 2 von der Spannung

Durch den beobachteten Einfluss der Zeit auf die Messung wurde bei der Messung der Verstärkung nach dem Verändern der Spannung mindestens eine Wartezeit von 20 Minuten vor jeder Messung eingehalten. Nach dieser Zeit wurden zwei Spektren von jeweils 300 Sekunden genommen, wobei ein Spektrum das Signal der Eisen-55 Quelle enthält und das zweite Spektrum das Rauschen in Abwesenheit der Quelle. In der Analyse wurde die Differenz beider Spektren gebildet, um den Effekt des Rauschens zu verringern. Anschließend wurde aus den MCA Spektren automatisiert der erste Peak mit einer Gaußfunktion gefittet und Peak und FWHM extrahiert. Die Umrechnung in die Verstärkung erfolgt wie in Kapitel 3.2.1 angegeben. Die Abstände innerhalb der Testkammer und die Verstärkereinstellungen sind identisch zu den unter Kapitel 3.2 angegebenen Werten. Das Spülen der Kammer wurde mindestens 8 Stunden vor Beginn der Messung gestartet. In den Zeiten zwischen der Messung am 16.09 und der Messung am 24.09 wurde die Kammer mit Trockenluft durchströmt. Während der Messung wurde die Temperatur und der Druck überwacht, wobei der Druck für die gesamte Messung um maximal einen Schritt des Analog to Digital Converter (ADC) verändert hat. Die Temperatur wurde an zwei Punkten überwacht, erstens die Lufttemperatur des Raumes und zweitens die Temperatur der Testkammer direkt am Kaptonfenster. Die Variation der Temperatur betrug weniger als $\pm 3^\circ\text{C}$. In Abbildung 3.10 ist das vom MCA aufgezeichnete Spektrum bei 635 Volt gezeigt, nachdem das Rauschen abgezogen wurde. Man kann erkennen, dass nur der obere Teil des Peaks gefittet wurde, um eine saubere Trennung des Peaks vom Untergrund zu erreichen.

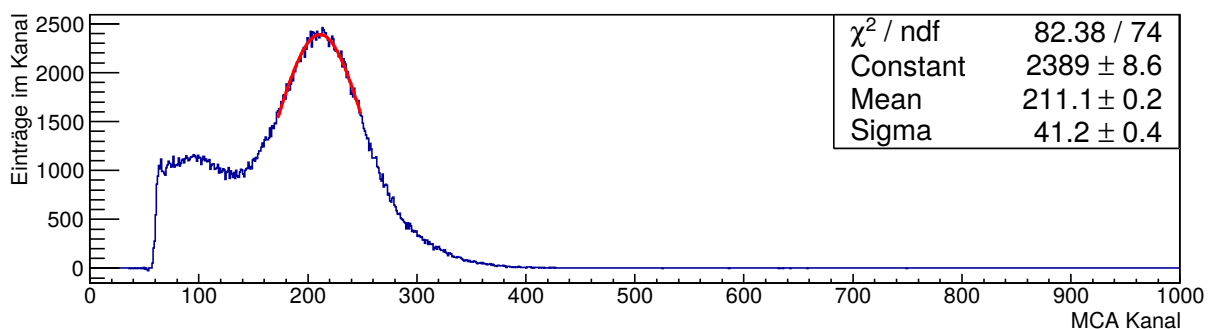


Abb. 3.10: Beispiel eines Spektrums. Die Spannung an der GEM betrug 635 Volt, dargestellt sind nur die ersten 1000 Kanäle

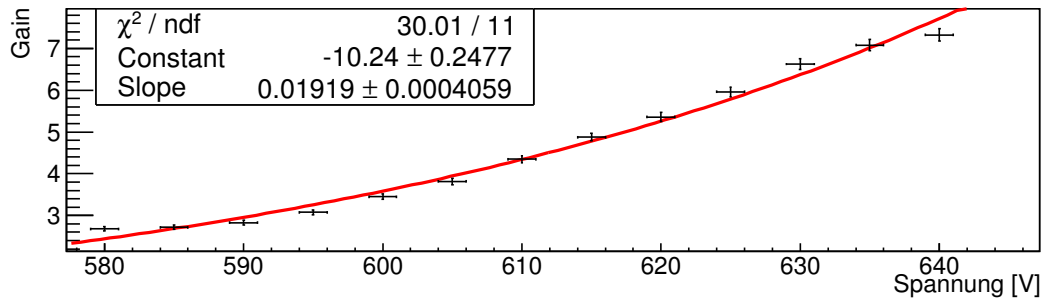


Abb. 3.11: Verstärkung der keramischen GEM C 2 am 24.09.2015 in Abhängigkeit von der Spannung. Zwischen zwei Messpunkten lagen mindestens 20 Minuten Wartezeit auf der neuen Spannung. Der Fit ist eine Exponentialfunktion der Art $G(U) = e^{p_0 + p_1 \cdot U}$

Die Messreihe wurde mit von 580 Volt bis 640 Volt geführt, für kleinere Spannungen konnte der Peak nicht vom Rauschen getrennt werden. Die Verstärkung ist in Abbildung 3.11 dargestellt, die gefittete Funktion ist eine Exponentialfunktion mit den Fitparametern $p_0 = -10.2 \pm 0.2$ und $p_1 = (0.01919 \pm 0.0004) \text{ V}^{-1}$.

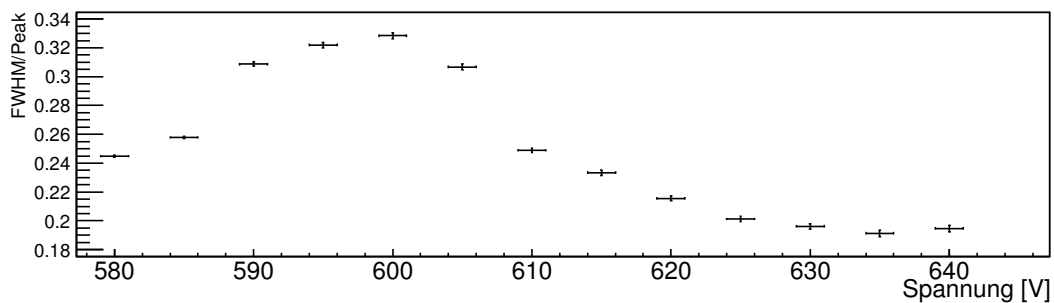


Abb. 3.12: Energieauflösung der keramischen GEM C 2 am 24.09.2015 in Abhängigkeit von der Spannung. Zwischen zwei Messpunkten lagen mindestens 20 Minuten Wartezeit auf der neuen Spannung.

In Abbildung 3.12 ist das Verhältnis zwischen FWHM und der Peakposition dargestellt, welche ein Maß für die Energieauflösung ist. Es ist zu erkennen, dass die Energieauflösung zwischen 640 V und 580 V deutlich schwankt.

3.4.3 Abhängigkeit der Verstärkung der keramischen GEM C 1 von der Spannung

Die keramische GEM C 1 wurde am 14.10.2015 gemessen, wobei eine Wartezeit von 15 Minuten nach jeder Spannungsänderung eingehalten wurde. Die Schwankung der Temperatur in der Testkammer betrug ± 2 °C und der Druck war während der Messung stabil im Rahmen der Messgenauigkeit der Wetterstation. Die Spannung wurde in Schritten von 10 Volt erhöht. Die Spannung wurde dabei zwischen nur sehr langsam verändert, so dass eine Spannungserhöhung von 10 Volt mehrere Minuten dauerte. Es zeigt sich, dass die Spannung auf Werte von bis zu 700 Volt erhöht werden kann. Bis etwa 700 Volt treten nur wenige Entladungen auf, aber bei 720 Volt nahm die Häufigkeit stark zu, was ein Ende der Messreihe erforderlich machte. Eine interessante Beobachtung ist, dass die Rate der Spannungsänderung scheinbar starken Einfluss auf die Wahrscheinlichkeit von Überschlügen in der keramischen GEM hat. Da die Spannungen von Hand eingestellt wurden sind die genauen Änderungsraten der Spannung nicht zuverlässig reproduzierbar.

Die gemessene Verstärkung ist in Abbildung 3.13 zu sehen, die Fitparameter sind $p_0 = -11.7 \pm 0.2$ und $p_1 = (0.02024 \pm 0.0003) \text{ V}^{-1}$.

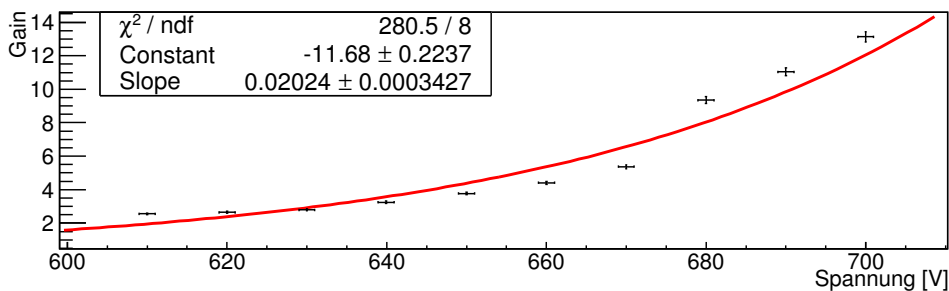


Abb. 3.13: Verstärkung der keramischen GEM C 1 am 14.10.2015 in Abhängigkeit von der Spannung. Zwischen zwei Messpunkten lagen mindestens 15 Minuten Wartezeit auf der neuen Spannung.

Messungen an der Zeitprojektionskammer (TPC)

Die Messungen an der TPC sollten in einem ersten Schritt eine Wiederinbetriebnahme der TPC ermöglichen. Dann sollten die Unterschiede zwischen der keramischen GEM und einer CERN GEM auf die Abbildung der Spur des Ultraviolett-Laser auf den Timepix Chip ermittelt werden. Bei der TPC waren im mittleren Fenster dünne Folien für die Strontiumquelle und im Fenster vor GEM 3 Saphirglas für den Laser eingebaut.

4.1 Messungen am Hochspannungssystem

Es musste zunächst die Funktion und die korrekte Verbindung der Hochspannungsquellen zu den GEM und der Kathode sichergestellt werden und das Teilungsverhältnis des Spannungsteilers ermittelt werden. Anschließend wurde die TPC mit dem Pads in Betrieb genommen und auf Funktion geprüft. Danach wurde eine Messreihe mit dem Timepix Chip durchgeführt.

4.1.1 Messung des Spannungsteilers für die Zwischenplatte

Für den Spannungsteiler wurde das Teilungsverhältnis und der Gesamtwiderstand bestimmt. Der Schaltplan des Spannungsteilers und seine Position im Stromkreis der Kathode ist in Abbildung 2.8 dargestellt. Der Widerstand wurde mit einem Theraohmmeter gemessen. Die Messung ergab einen Widerstand zwischen dem Eingang des Spannungsteiler und Masse von $R = 72 \pm 2 \text{ M}\Omega$. Das Teilungsverhältnis wurde bestimmt, indem das Ausgangssignal mit einem Multimeter gemessen wurde, während die Eingangsspannung mit der Silena Milano Mod 7712 Spannungsquelle von 50 V bis 2000 V in Schritten von 50 Volt variiert wurde. Das Ergebnis dieser Messreihe ist in Abbildung 4.1 abgebildet.

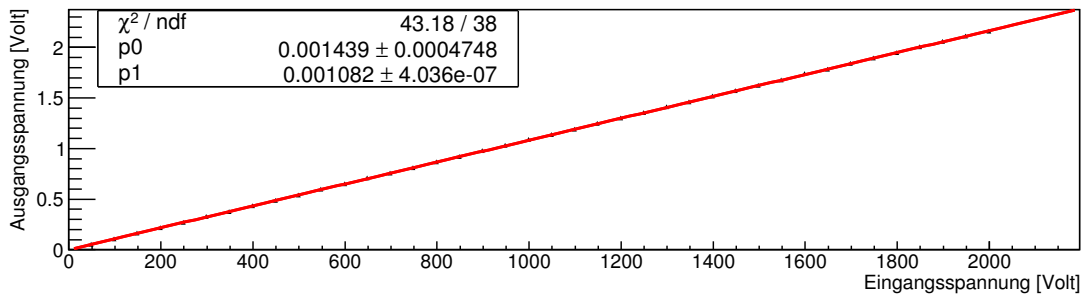


Abb. 4.1: Lineare Regression für das Teilungsverhältnis des Spannungsteilers

Die Steigung der linearen Regression ist im späteren Einsatz der Bruchteil der Spannung an der Zwischenplatte, den das Voltmeter misst. Man erkennt, dass die Messwerte sehr gut mit dem Fit übereinstimmen und die Fehler auf die Einzelmessungen zu klein sind, um sie in der gleichen Skalierung darzustellen. Der Fehler auf die Hochspannung liegt bei 1 V und bei der Messung der Niederspannung bei 1 mV. Der Fit liefert ein Teilungsverhältnis von $0,0010822 \pm 0,0000004$, mit diesem Wert kann das Labview-Programm die Spannung an der Zwischenplatte berechnen.

4.1.2 Funktionstest der Hochspannungsversorgung

Es wurde getestet, ob die elektrische Verbindung zwischen den Hochspannungsquellen und den GEMs besteht. Das Kontrollsystem für die Hochspannungsversorgung wurde eingeschaltet und alle Stromlimits auf $50 \mu\text{A}$ gesetzt, um den HV-Alarmzustand für die Amperemeter aufzuheben und die Spannungen auf die Ausgänge durchschalten. Dann wurde jeweils eine Hochspannungsquelle bis auf maximal 20 V hochgefahren und zuerst die Spannung direkt am Ausgang der Spannungsquelle gemessen, was als Messpunkt 1 in Abbildung 4.2. Danach wurde an dem Lötunkt der GEM gegen Masse gemessen, dies ist Messpunkt 2.

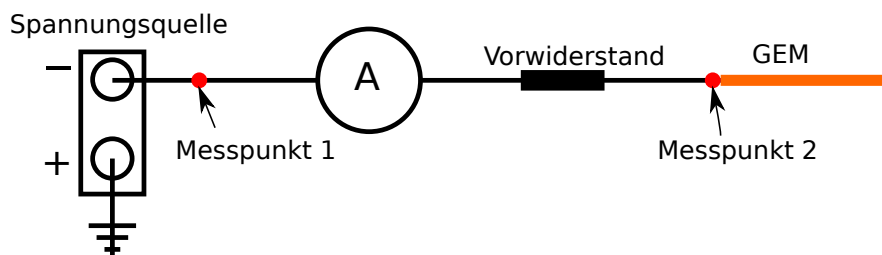


Abb. 4.2: Messpunkte für den Test der GEM Anschlüsse

Dabei zeigte sich, dass die Kathode von GEM 3 durch ein fehlerhaft angeschlossenes Kabel keine Verbindung zu der betreffenden Spannungsquelle hatte. Nachdem dieser Fehler beho-

ben wurde, gab es eine Verbindung zwischen allen GEMs und ihren Spannungsversorgungen. Mögliche Verwechslungen zwischen den Kabeln konnten so ebenfalls ausgeschlossen werden. Die Vorwiderstände zwischen der GEM und dem Amperemeter bewirken bei dieser Messung, dass ein Multimeter mit $10\text{ M}\Omega$ Innenwiderstand nur etwa die halbe Spannung sieht, somit liegen die Vorwiderstände in der gleichen Größenordnung. Im späteren Betrieb ist dieser Spannungsabfall nicht mehr relevant, weil beim Betrieb in der Testkammer kein messbarer Strom floß und eine GEM einen extrem hohen Widerstand $> 10\text{ G}\Omega$ hat. Anschließend wurde die Verbindung zwischen Kathode, Feldkäfig und der zugehörigen Spannungsquelle überprüft.

Da nach diesen Tests die Funktion aller Spannungsversorgungen bis in die TPC geprüft war, wurde im Folgendem ein Test des Hochspannungssystems bei Betriebsspannung durchgeführt.

4.1.3 Einstellung der Hochspannungen

In die TPC wurde das Auslesesystem mit Pads anstelle des Timepix Chips, sowie die CERN GEMs mit den Nummern 15, 18 und 19 eingebaut. Diese waren zuvor auf ihre Funktion getestet worden, allerdings ohne eine Kalibrierung durchzuführen. Danach wurde die Kammer verschlossen und mit Lötstopp versiegelt. Da die Leckraten zu groß waren, um einen stabilen Gasstrom durch die Kammer zu ermöglichen, wurde mit einem Gasspürgerät für Argon und Kohlenstoffdioxid nach den Leckstellen gesucht und diese erneut abgedichtet. Nachdem die Kammer abgedichtet war, wurde sie für einen Tag gespült. Die ungenutzten Pads wurden mit $50\ \Omega$ mit Masse verbunden und der genutzte Kanal mit einem ladungssensitiven Verstärker an das Oszilloskop angeschlossen. Anschließend wurde das Hochspannungssystem betriebsbereit gemacht und die Spannungen automatisch hochgefahren. Für den Test wurde die variable Röntgenquelle mit Molybdän als Target genutzt, so dass sie auf Höhe des ersten Fensters vor den GEM in die TPC strahlte. Dabei liefert Molybdän rund 85 % Röntgenphotonen in zwei Linien bei $17,4\text{ keV}$ und zwei weniger intensive Linien bei rund $19,6\text{ keV}$ Photonenenergie, wobei diese Linien durch Gammastrahlung aus dem Zerfall von Americium-241 angeregt werden. So konnte am Oszilloskop gesehen auf die gleiche Art wie in der Testkammer gesehen werden, wenn Ladung auf die Pads trifft und somit ein Signal vorhanden ist. Die Box mit den Vorwiderständen der GEM sowie die Box des Spannungsteilers wurden geöffnet und ein Multimeter mit einer Hochspannungssonde bereitgelegt. Dann wurde die Spannung für die Kathode von GEM 3 vor dem Vorwiderstand in der Box und die Spannung der Zwischenplatte am Eingang des Spannungsteilers gemessen. Dabei zeigte sich, dass bei 6 kV Kathodenspannung und $2,3\text{ kV}$ Kathodenspannung für GEM 3 die Spannung für die GEM kleiner als die Spannung der Zwischenplatte ist ¹. Anders ausgedrückt

¹Die Spannungen sind alle negativ, es werden nur die Beträge angegeben

4 Messungen an der Zeitprojektionskammer (TPC)

besteht zwischen der Zwischenplatte und der GEM eine Potentialdifferenz, die Elektronen zurück in das Driftvolumen treibt und damit verhindert, dass die TPC korrekt funktioniert. Zunächst wurde die Spannung der Kathode schrittweise auf 8 kV erhöht, um die Spannungen der Zwischenplatte and die Spannung der Kathode von GEM 3 anzugleichen. Da der Potentialunterschied damit nur verringert werden konnte, aber nicht aufgehoben, wurde im nächsten Schritt die Spannung der Kathode von GEM 3 schrittweise verringert, bis eine Spannungsdifferenz von 20 Volt die Elektronen in die GEM beschleunigte. Anschließend wurde GEM 3 wieder auf ihre Betriebsspannung von 380 Volt hochgefahren, indem die Spannung der Anode verändert wurde und dabei das Transferfeld 2 verringert wurde. Nach diesen Anpassungen der Spannung konnte auf dem Oszilloskop das durch die Röntgenquelle erzeugte Signal gesehen werden. Zur Überprüfung wurde die Röntgenquelle entfernt und der Effekt beobachtet. Es ist deutlich zu erkennen, dass die Präsenz der Quelle mehr Pulse des Verstärkers zur Folge hat, siehe Abbildung 4.3. Die Spannungen sind in Tabelle 4.1 angegeben.

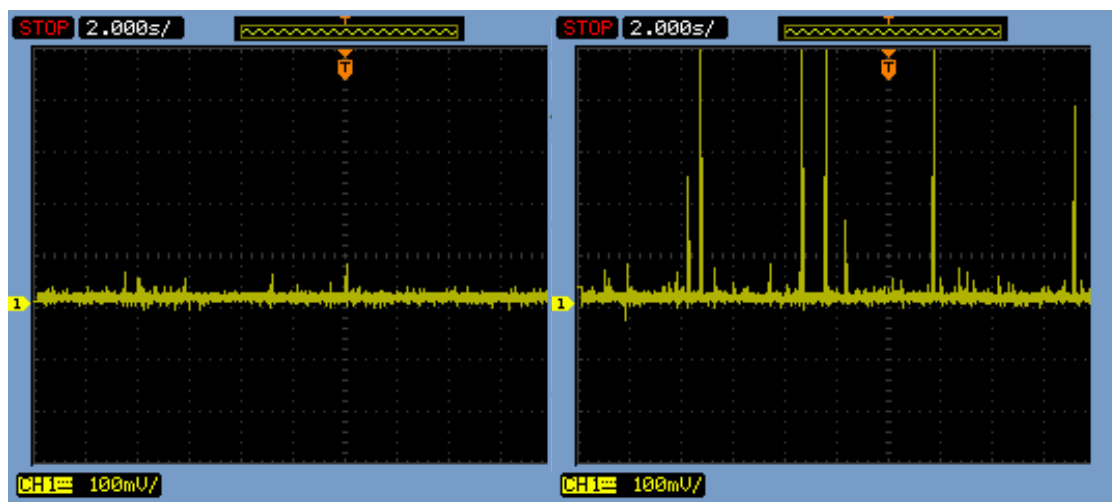


Abb. 4.3: Zwei Momentaufnahmen am Oszilloskop. Links ohne Röntgenquelle, rechts mit Röntgenquelle mit Molybdäntarget.

	Kathode	Anode	Feld	Feldstärken	Abstand
GEM 1	780 V	400 V	Induktionsfeld	$200 \frac{\text{V}}{\text{mm}}$	2 mm
GEM 2	1560 V	1180 V	Transferfeld 1	$200 \frac{\text{V}}{\text{mm}}$	2 mm
GEM 3	2180 V	1800 V	Transferfeld 2	$120 \frac{\text{V}}{\text{mm}}$	2 mm
			Driftfeld	$20 \frac{\text{V}}{\text{mm}}$	290 mm

Tab. 4.1: Die genutzten Spannungen für drei CERN GEM und die resultierenden Felder beim ersten, erfolgreichen Test. Die Kathodenspannung betrug 8000 V

Nach diesem Test wurden sämtliche Boxen wieder verschlossen und weitere Tests mit dem Timepix Chip vorbereitet. Weil die Spannungsversorgung der Zwischenplatte und der Kathode ausschließlich über das Verhältnis der Widerstände und die Kathodenspannung erfolgt wurden im Folgendem die Spannung der Kathode auf 8000 V und die Spannung der Kathode von GEM 3 auf 2180 V gesetzt.

4.2 Messungen der Zeitprojektionskammer (TPC) mit drei CERN GEMs

Nachdem die TPC erfolgreich in Betrieb genommen wurde, wurde als nächstes die Vergleichsmessung mit drei CERN GEMs durchgeführt. Dazu wurde die Versiegelung der Pads geöffnet und die Pads mit dem Timepix Chip G 11 W 70 und seinem Halter ersetzt. Danach wurde die Kammer eine Nacht lang gespült und am nächsten Morgen das Hochspannungssystem gestartet und auf die in Tabelle 4.1 angegebenen Werte eingestellt. Der Deckel wurde dabei nicht entfernt, es wurden weiterhin die CERN GEMs 15, 18 und 19 genutzt.

Als Testsignal wurde der Ultraviolett-Laser genutzt, welcher eine $(500 \pm 100) \mu\text{m}$ breite Spur erzeugen sollte. Dies würde einer Breite von (10 ± 2) Pixeln auf dem Timepix-Chip entsprechen. Die hier in Abbildung 4.4 gezeigten Bilder sind nachbearbeitet, da der verwendete Chip zwei Reihen mit defekten Pixeln hatte und diese nachträglich entfernt wurden, um die Ladungsverteilung auf dem Chip sichtbar zu machen. Die Spur des Lasers ist im Mittel 16 Pixel breit, wobei die Breite mit der mittleren quadratischen Abweichung RMS geschätzt wird. Dies entspricht etwas mehr als dem Durchmesser der Löcher in der GEM.

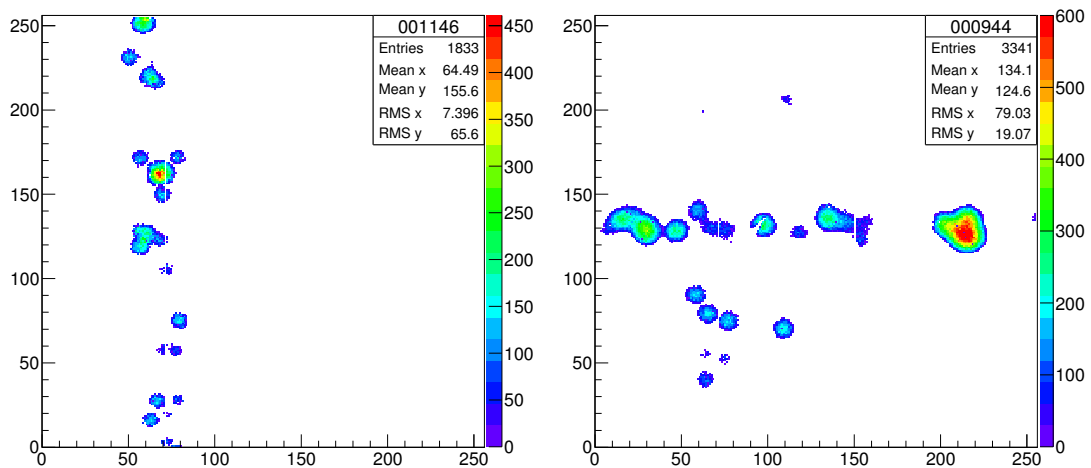


Abb. 4.4: Zwei Aufnahmen des Timepix Chips am 19.08.2015. Das rechte Bild zeigt ein Teilchen, das die TPC fast senkrecht zum Boden passiert hat und Teile der Spur des Ultraviolett-Laser, während das linke Bild nur die Spur des Ultraviolett-Laser zeigt. Die defekten Pixel sind als weiße Streifen bei $x = 72$ und $x = 151$ zu erkennen.

4.3 Test mit keramischer GEM und Laser

Nachdem die keramische GEM in der Testkammer auf Stabilität und Verstärkung getestet worden ist, wurde C 2 als nächstes in die TPC eingebaut. Um die höhere Betriebsspannung der keramischen GEM bereitstellen zu können, mussten die Transferfelder und das Induktionsfeld der TPC reduziert werden. Dies beeinflusst sowohl die Driftgeschwindigkeit als auch die Diffusion der Elektronen. Bei diesem Test wurde die keramische GEM C 2 als GEM 3 in die TPC eingebaut. GEM 15 und 18 wurden wie zuvor auf den Positionen eins und zwei eingebaut. Ein erster Testlauf am 02.10.2015 musste wegen Problemen mit dem Timepix Chip abgebrochen werden. Der Timepix Chip wurde getauscht und der Chip mit Kennung E 9 W 70 eingebaut. Lediglich die Versiegelung im Bereich der Timepix Chips und seiner Verschraubung wurde dafür gelöst. Der Chip wurde mit der automatischen Kalibrierung von TOS kalibriert und für die folgenden Messungen verwendet. In einem weiteren Test am 19.10.2015 wurde die TPC erneut gestartet und eine Messreihe im TOT-Modus durchgeführt. Die Spannungen für die GEM und die Driftfelder sind in Tabelle 4.2 dargestellt. Die CERN GEMs wurden mit 390 V betrieben, während die keramische GEM langsam bis auf 720 V hochgefahren wurde. In Abbildung 4.5 sind zwei Aufnahmen der Spur des Ultraviolett-Laser zu sehen. Die Breite der Spur beträgt rund 40 Pixel, was ein vergleichbar zu den Lochdurchmesser der keramischen GEM ist.

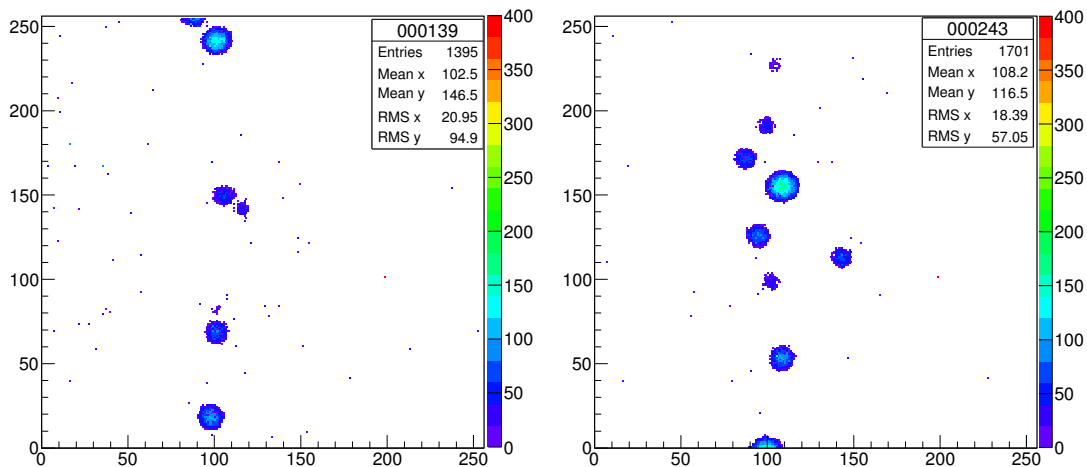


Abb. 4.5: Zwei Aufnahmen des Timepix Chips am 19.10.2015. Beide Bilder zeigen die Spur des Ultraviolett-Laser bei Pixel 100 auf der x-Achse

4 Messungen an der Zeitprojektionskammer (TPC)

	Kathode	Anode	Feld	Feldstärken	Abstand
GEM 1	790 V	400 V	Induktionsfeld	$200 \frac{\text{V}}{\text{mm}}$	2 mm
GEM 2	1360 V	980 V	Transferfeld 1	$95 \frac{\text{V}}{\text{mm}}$	2 mm
GEM 3	2180 V	1460 V	Transferfeld 2	$50 \frac{\text{V}}{\text{mm}}$	2 mm
			Driftfeld	$20 \frac{\text{V}}{\text{mm}}$	290 mm

Tab. 4.2: Die genutzten Spannungen für zwei CERN GEM und eine keramische GEM. Die Kathodenspannung betrug 8000 V

In diesem Kapitel werden die Messergebnisse noch einmal zusammengefasst und eine Abschätzung der systematischen Fehler durchgeführt.

5.1 Stabilität der keramischen GEM

Die keramische GEM zeigt, wie in Kapitel 3.4.1 gezeigt, in den ersten 10 Minuten nach dem Verändern der Spannung deutliche Einschalteneffekte. Die Langzeitmessungen zeigen, dass nach rund 20 Minuten die keramische GEM eine nahezu konstante Verstärkung hat und nach einer Stunde Wartezeit verändert sich die Verstärkung nur noch minimal. Bei der Energieauflösung unter konstanter Spannung zeigen sich nur geringe Schwankungen. Zusätzliche Messreihen sollten durchgeführt werden, um das Verhalten der keramischen GEM bei Spannungsänderungen genauer zu charakterisieren und auf Korrelationen zwischen der Änderungsrate der Spannung und dem Auftreten von Entladungen zu testen. Es konnten auch Hinweise auf eine Schwankung mit Temperatur und Druck beobachtet werden, allerdings waren diese kaum erkennbar. Dies ist bei einem auf Gasverstärkung basierendem System zu erwarten, da der Townsendkoeffizient auch von der Gasdichte abhängt und sich die Gasmischung unter den gegebenen Bedingungen wie ein ideales Gas verhält. Zusätzliche Messreihen mit stärkerer Variation von Temperatur und Druck könnten durchgeführt werden, um den Einfluss dieser Parameter genauer zu untersuchen.

5.2 Verstärkung der keramischen GEM

Die keramische GEM ist doppelt so dick wie eine CERN GEM. Es ist zu erwarten, dass die erforderliche Betriebsspannung erheblich über den Werten für eine CERN GEM liegt und die Maximalspannung rund das Doppelte beträgt. In diesen Tests wurde die keramische GEM

C 2 bis 640 V betrieben, wobei eine Verstärkung um einen Faktor von 7 erreicht wurde. Vergleicht man den Fit der beiden keramischen GEMs, so bekommt man $p_0 = -10.2 \pm 0.2$ und $p_1 = 0.01919 \pm 0.0004 \text{ V}^{-1}$ für die keramische GEM C 2 und für C 1 $p_0 = -11.7 \pm 0.2$ und $p_1 = 0.02024 \pm 0.0003 \text{ V}^{-1}$. Die Fitparameter für die beiden keramischen GEMs unterscheiden sich um maximal 15 %, was durch kleinere Variationen bei der Herstellung oder die größere Maximalspannung bei der Messung C 1 verursacht werden kann. Die beiden CERN GEMs, welche zum Vergleich gemessen wurden, haben die Fitparameter $p_0 = -7.2 \pm 0.4$ und $p_1 = 0.0276 \pm 0.0011 \text{ V}^{-1}$ für GEM 17 und $p_0 = -12.8 \pm 0.4$ und $p_1 = 0.0406 \pm 0.0011 \text{ V}^{-1}$ für GEM 20. Hier sind die Abweichungen zwischen den beiden CERN GEMs deutlich größer, als die Unterschiede zwischen den beiden keramischen GEMs. Dies kann eine Folge von unterschiedlichen Lagerbedingungen und Vorgeschichten der GEMs sein, die nicht dokumentiert ist.

5.2.1 Fehlerbetrachtung

Die Fehler der gefitteten Funktionen sind in den meisten Messungen klein, mit $\frac{\chi^2}{n} \approx 1$. Lediglich für C 1 ist der Wert für $\frac{\chi^2}{n}$ deutlich zu groß.

Es gibt mehrere Quellen systematischer Fehler. So wurde für die Kalibrierung eine Kapazität genutzt, welche eine Kapazität von 1 pF und einen Fehler von 2% hat. Bei kleinen Kapazitäten können auch parasitäre Kapazitäten bedeutsam werden, allerdings kann dieser Fehler nur schwer abgeschätzt werden. Ein weiterer systematischer Fehler ist, dass die Anzahl der primären Elektronen aus der Absorption der Röntgenstrahlung nur aus der Ionisationsenergie der Gase berechnet werden konnte. Dies gilt nur unter der Annahme, dass die gesamte Photonenenergie in Elektron-Ionenpaare umgesetzt wird.

Es wurden keine auffälligen Schwankungen von Druck oder Temperatur während der Messreihen beobachtet, die Variation lag für die Messungen der Verstärkung im Bereich des Auflösungsvermögens der Wetterstation und nur bei der Langzeitmessung am 16.09.2015 traten signifikante Schwankungen der Temperatur auf. Wenn man annimmt, dass sich die Gasmischung als ideales Gas verhält, so kann die Schwankung der Dichte abgeschätzt werden. Der Druck schwankte um maximal $\pm 30 \text{ hPa}$ und die Temperatur um maximal 10°C . Dies entspricht einer maximalen Schwankung der Gasdichte von rund 7 %.

5.3 Funktion der Zeitprojektionskammer

Die TPC wurde mit einer Kathodenspannung von 8000 V und einer Spannung von 2180 V auf der Kathode von GEM 3 unter Verwendung von drei CERN GEMs in Betrieb genommen, wie in Kapitel 4.1 beschrieben. Die Funktion konnte sowohl mit Pads als auch mit dem Ti-

mepix Chip reproduziert werden. Die Auslese mit dem Timepix Chip zeigte, dass sowohl die Spurerzeugung mit dem Ultraviolett-Laser als auch die Detektion von kosmischer Strahlung funktionieren. Das Teilungsverhältnis des Spannungsteilers wurde mit $0,0010822 \pm 0,0000004$ bestimmt, bei einem Gesamtwiderstand von $72 \pm 2 \text{ M}\Omega$.

5.4 Ortsauflösung der keramischen GEM

Diese Auswertung ist mit den zur Verfügung stehenden Daten nur eine relativ grobe Abschätzung. Es gibt viele systematische Effekte, die zu beachten sind, und die in weiteren Messungen vermieden werden sollten. Als Maß für die Breite der Spur wird der RMS in x-Richtung der Histogramme benutzt, da keine vollständige Rekonstruktion der Spuren durchgeführt wurde. Was beobachtet werden kann ist, dass der $500 \pm 100 \mu\text{m}$ breite Laserstrahl nach der Verstärkung mit den drei CERN GEM eine 16 Pixel breite Spur auf dem Timepix erzeugt, während die Spuren bei der keramischen GEM und zwei CERN GEM Breiten um 40 Pixel erzeugten.

Dies ist eine um den Faktor 2,5 breitere Spur. Dies scheint eine direkte Folge des um einen Faktor 2,8 größeren Lochabstands und Lochdurchmessers der keramischen GEM sein und ist in Übereinstimmung mit den Erwartungen. Eine Messung der Auflösung mit der keramischen GEM direkt vor dem Timepix Chip wurde nicht durchgeführt.

5.4.1 Fehlerbetrachtung

Bei dieser Messung gibt es das Problem, dass die Feldstärke der Transferfelder und des Induktionsfeldes verändert werden mussten, um genug Spannung für den Betrieb der keramischen GEM bereitzustellen. Die Reduktion der Feldstärke bewirkt, dass sich die Diffusion sehr stark verändert, da die Diffusionskoeffizienten im Bereich zwischen $50 \frac{\text{V}}{\text{mm}}$ und $200 \frac{\text{V}}{\text{mm}}$ ein Minimum durchlaufen [AS]. Das verringerte Driftfeld sollte eine verringerte Diffusion und damit eine scheinbar bessere Ortsauflösung der keramischen GEM bewirken. Allerdings kann dieser Fehler mit dem derzeitigen Versuchsaufbau nicht vermieden werden, weil die Spannung der Zwischenplatte an die Spannung der Kathode gebunden ist und die betreffende Hochspannungsquelle keine höhere Spannung bereitstellen kann.

5.5 Zusammenfassung

Es wurde gezeigt, dass die Kombination aus keramischer GEM, zwei CERN GEMs und Timepix Chip die Aufnahme der Ionisationsspur des Lasers ermöglicht, wobei die Spurbreite gegenüber einer Anordnung von drei CERN GEMs um einen Faktor von 2,5 zunimmt. Die

keramische GEM scheint resistenter gegen Schäden durch Funken zu sein und kann Betriebsspannungen von über 700 Volt erreichen. Dies könnte einen Betrieb näher an der Maximalspannung ermöglichen. Die Steigung der Verstärkung beträgt etwa 50 % des Wertes für eine CERN GEM, wobei die Variation zwischen den beiden keramischen GEM maximal 15 % beträgt. Zudem zeigen sich deutliche Einschalt Effekte bei den keramischen GEMs, die nach maximal 30 Minuten verschwinden.

Geräteliste und Programme

6.1 TPC

Einsatzzweck und Kommentare	Hersteller	Typ
Hochspannung GEM	ISEG	NHQ 204M
Hochspannung Kathode	ISEG	NHQ 208L
Stromüberwachung	Universität Heidelberg	A339 2x8 Channel Currentmeter
UV-Laser mit $\lambda = 266\text{nm}$	Cry Las	1Q226-2
Timepix Chip G 11 W 70	Universität Bonn&CERN	Timepix 2
Timepix Chip E 7 W 70	Universität Bonn&CERN	Timepix 2
FPGA-Karte	Xilinx	ML605
Quelle für TPC	Amersham	AMC.2084 Variable X-Ray-source
Quelle für TPC		Sr-90 37MBq
Spannungsmessung	Keithley	2000 Multimeter
Zwischenplatte		Spannungsteiler $\frac{1}{1000}$ 1 G Ω
Messung der Hochspannungen		
Spannungsquelle für FPGA	Agilent	E3648A
und Cremat Verstärker		
Auslese mit Pad	Cremat	Ladungssensitiver Verstärker

6.2 Testkammer

Einsatzzweck und Kommentare	Hersteller	Typ
Verstärkung und Impulsformung	Ortec	672 Spectroscopy Amplifier
Verstärkung und Impulsformung	Tenelec	TC 244
Ladungssensitiver Verstärker	Universität Siegen	von Dipl.-Ing. Rudolf Seibert
MCA für kalibrierte Messungen	Fast ComTec GmbH	MCA-3
MCA für Langzeitmessungen		MCA
Oszilloskop	Agilent	DSO 1024A
Pulsgenerator zur Kalibrierung	Agilent	33250A
Netzteil für Vorverstärker	Agilent	E3648A
Röntgenquelle für Messungen		800MBq Fe-55
Versorgung GEM	Silena Milano	Mod 7712
Versorgung Kathode	ISEG	NHQ 103M

6.3 Verschiedenes

Einsatzzweck und Kommentare	Hersteller	Typ
Auslese des Druck und Temperatursensors	Velleman	K8055
Verstärkung für Gasmonitor	Ortec	672 Spectroscopy Amplifier
Isolation, Fenster für Röntgenstrahlung	DuPont	Kapton
Messung von Widerstand, Spannung, Temperatur	Agilent	U1251A Multimeter
Ungerahmte, passivierte CERN GEM mit 5 cm Seitenlänge	CERN	GEM-50x50-140-70/50-P-U

6.4 Verbrauchsmaterialien

Einsatzzweck und Kommentare	Hersteller	Bezeichnung
Gasflasche mit Argon	Messer	300Bar 50l Argon 5.0
Gasflasche mit Kohlenstoffdioxid	Messer	200Bar 50l CO ₂
Lötmaske zum Versiegeln	Chemtronics	Chemmask CM8 peelable
Isolierband	Scotch	Super 33+
Isolation im Kammerinneren	DuPont	Kapton Isolierband

6.5 Programme

Im Folgendem ist eine Auflistung der für die Auswertung geschriebenen Programme. Alle Programme sind in C++ mit dem g++ Compiler entsprechen dem 2011 Standard und root in der Version 6.05_02 – gcc – 4.9 – amd64/, Ausnahmen werden explizit genannt.

6.5.1 Timepix data converter

Der Timepix Chip kann die Daten in zwei Formaten abspeichern. Die Daten im “zero supressed” Modus können leicht von root eingelesen werden. Das Einlesen der kompletten Matrix wurde mit einem selbst geschriebenen Programm erreicht, welches die Dateien automatisch einlesen und in ein Histogramm eintragen kann. Dabei können einzelne Spalten unterdrückt werden, um defekte Pixel zu entfernen.

6.5.2 Calibration plotter

Dieses Programm liest mehrere Textdateien mit Peakposition und Spannung am Pulsgenerator. Aus diesen erzeugt es die Kalibrierungsgraden für die Verstärkerkette der Testkammer.

6.5.3 Long gain plotter

Dieses Script liest die Daten des unkalibrierten MCA ein und stellt den Verlauf von Peakposition und FWHM über die Zeit dar. Dazu wird das MCA-Spektrum eingelesen und in einem Histogramm dargestellt. Anschließend wird eine Normalverteilung an den Peak in dem höchsten Kanal gefittet und aus diesem Fit die Position des Maximums und die Breite extrahiert.

6.5.4 Gain Plotter

Die Gain Plotter nutzen die Kalibrierung und die Spektren des Fastcard MCA, um die Verstärkung der GEM mit der Spannung zu bestimmen. Es gibt die Möglichkeit, die Peakposition und FWHM direkt mit der Software des MCA zu bestimmen und als Textdatei einzulesen, oder, ähnlich wie bei dem Programm für den unkalibrierten MCA, die Peakposition und Breite automatisch zu bestimmen. Die Fehler auf die einzelnen Messungen werden automatisch aus den Fitgenauigkeiten und den Fehlern auf die Kalibration gemäß der Fehlerfortpflanzungen in Kapitel 3 berechnet.

6.5.5 Dichtemessung

Dieses Labview-Programm wurde nicht von mir geschrieben und zeichnet die Daten der Wetterstation auf. Die Daten können anschließend als Textdatei gespeichert werden und von anderen Programmen eingelesen werden.

6.5.6 HV-Control

Ein Labview-Programm von Adrian Kube steuert die Hochspannungsversorgung der TPC. Es ermöglicht das kontrollierte und gleichmäßige Verändern der Versorgungsspannungen und überwacht die Amperemeter.

Literatur

- [AS] Yasser Assran und Archana Sharma. „Transport Properties of operational gas mixtures used at LHC“. In: (). arXiv: 1110.6761v1 [physics.ins-det].
- [Aur+] G. Auriemma u. a. „Experimental determination of the Townsend coefficient for Argon-CO₂ gas mixtures at high fields“. In: *Nucl.Instrum.Meth. A513 (2003) 484-489* (). DOI: 10.1016/S0168 - 9002(03) 02074 - 6. arXiv: physics/0307073v1 [physics.ins-det].
- [Beh+13] Ties Behnke u. a. „The International Linear Collider Technical Design Report - Volume 1: Executive Summary“. In: (Juni 2013). arXiv: 1306.6327v1 [physics.acc-ph].
- [BRR08] Walter Blum, Werner Riegler und Luigi Rolandi. *Particle detection with drift chambers*. Springer Science & Business Media, 2008. ISBN: 978-3-540-76683-4.
- [Cud07] Xavier Llopart Cudié. „Design and characterization of 64K pixels chips working in single photon processing mode “. Diss. Mid Sweden University, 2007. ISBN: 978-91-85317-56-1.
- [Dos] Bernd Dostal. „ILCBoard“. Internes Dokument der Teilchenphysik der Universität Siegen.
- [EM05] Developement of Electronic Modules. *GEM-50x50-140-70/50-P-U*. Techn. Ber. CERN, 2005. URL: <http://ts-dep-dem.web.cern.ch/ts-dep-dem/products/gem/stores/GEM-50-50-140-70-50-P-U.htm>.
- [Gau08] Bakul Gaur. „First studies of a prototype GEM readout for a future ILC-TPC“. Masterarbeit. Universität Siegen, 2008.

- [Gri87] David Griffiths. *Introduction to elementary particles*. Second Edition. Wiley-VCH, 1987. ISBN: 978-3-527-40601-2.
- [KL] J Kaminski und M Lupberger. *Manual for the Timepix readout*.
- [Mpi] Website. URL: <https://medipix.web.cern.ch/medipix/pages/medipix2/timepix.php>.
- [Oli+14] K. A. Olive u. a. „Review of Particle Physics“. In: *Chin. Phys.* C38 (2014), S. 090001. DOI: 10.1088/1674-1137/38/9/090001.
- [Ped] Mark Pedron. „Untersuchung eines zweikanaligen Gasmischsystems“. Teil der Dokumentation der TPC der Universität Siegen.
- [Sau] Fabio Sauli. „GAS ELECTRON MULTIPLIER (GEM) DETECTORS: PRINCIPLES OF OPERATION AND APPLICATION“. In: *Comprehensive Biomedical Physics Vol. 6*.
- [Wer] Ulrich Werthenbach. „Zeichnungen und Baupläne“. Zeichnungen über den Versuchsaufbau in Siegen.

Erklärung

Hiermit erkläre ich, dass ich die vorliegende Bachelor-Arbeit selbstständig verfasst und keine anderen als die angegebenen Quellen und Hilfsmittel benutzt, sowie Zitate und Ergebnisse Anderer kenntlich gemacht habe.

.....

(Ort)

(Datum)

.....

(Unterschrift)