

Stabilitätstests an einer
Viendrahtproportionalkammer nach
ALICE-Geometrie bei den
Gasmischungen $Ne-CO_2$ und
 $Ne-CO_2-N_2$

BACHELORARBEIT

am Institut für Kernphysik Frankfurt

vorgelegt von

FABIAN PLIQUETT

Fachbereich Physik
der Goethe-Universität
Frankfurt am Main

März 2014

Erstgutachter: Prof. Dr. H. Büsching
Zweitgutachter: Prof. Dr. H. Appelshäuser

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
2	Grundlagen	3
2.1	Standardmodell	3
2.2	Starke Wechselwirkung	4
2.3	Quark-Gluon-Plasma	5
3	Experiment	7
3.1	LHC	7
3.2	ALICE	7
3.3	ALICE-TPC	9
3.3.1	Allgemeine Funktionsweise	9
3.3.2	Aufbau der ALICE-TPC	11
3.3.3	Gasmischung	12
3.4	IKF-Testaufbau	15
3.4.1	Gehäuse	15
3.4.2	Drahtkammer	18
3.4.3	Radioaktive Quelle	20
3.4.4	Elektronik	21
3.4.5	Gas	22
4	Messungen	25
4.1	Pulsermessungen	25
4.1.1	Nullverschiebung durch Elektronik	25
4.1.2	Verstärkungsfaktoren des Hauptverstärkers	26
4.2	Gasmischung	27
4.3	Qualitative Stabilitätstests	30
4.3.1	Quellenposition	30
4.3.2	Erste Stabilitätsmessungen	32
4.4	Quantitative Stabilitätstests	33
4.4.1	Primärstrommessungen	33
4.4.2	Stabilitätstests mit der α -Quelle	34
4.4.3	Stabilitätstests mit der γ -Quelle	35

4.4.4	Stabilitätstests mit der γ -Quelle bei umgebauter Kammer	37
5	Zusammenfassung	41
	Quellenverzeichnis	43
	Abkürzungsverzeichnis	45
	Danksagung	47

1 Einleitung

Die heute bekannte Materie besteht aus Atomen und Molekülen, die aus Protonen, Neutronen und Elektronen zusammengesetzt sind. In den 1960er Jahren wurde in Beschleunigerexperimenten festgestellt, dass auch Protonen und Neutronen eine innere Struktur haben. Dies deutete darauf hin, dass sie nicht, wie bis dahin angenommen, die kleinsten Bausteine der Materie sind, sondern dass es noch kleinere Bestandteile geben muss. Heute weiß man, dass dies die Quarks und Gluonen sind. Quarks und Gluonen können normalerweise nicht isoliert beobachtet werden. Sie treten nur in einer Kombination aus drei Quarks oder als Quark-Antiquark-Paar auf.

Die Wechselwirkung der Quarks untereinander wird durch die Quantenchromodynamik (QCD) beschrieben. Die QCD sagt für hohe Temperatur oder hohen Druck einen neuen Zustand der Materie voraus, das Quark-Gluon-Plasma (QGP). Das QGP ist ein Zustand, in dem sich Quarks und Gluonen innerhalb enger Grenzen frei bewegen können. Man glaubt, dass das QGP kurz nach dem Urknall vorgelegen hat oder dass es diesen Zustand im Inneren von Neutronensternen gibt.

Alternativ kann man versuchen, ein QGP in Beschleunigerexperimenten zu erzeugen. Der *Large Hadron Collider* (LHC) ist der zur Zeit größte und leistungsstärkste Teilchenbeschleuniger der Welt und befindet sich an der Kernforschungseinrichtung CERN (*Conseil Européen pour la Recherche Nucléaire*) in Genf. Eins der vier großen Experimente am LHC, *A Large Ion Collider Experiment* (ALICE), wurde für die Erzeugung des QGP und die Untersuchung von dessen Eigenschaften optimiert.

Die *ALICE-Time-Projection Chamber* (TPC) ist der wichtigste Detektor zur Teilchenidentifizierung des ALICE-Experiments. Es handelt sich dabei um eine Spurendriftkammer, ein zylindrisches mit Gas gefülltes Volumen, in dem die Spuren von geladenen Teilchen nachgewiesen werden können. Diese ionisieren das Gas und die entstehenden Elektronen werden von Vieldrahtproportionalkammern detektiert. Um die TPC in einem stabilen Zustand betreiben zu können, müssen verschiedene Parameter bekannt sein. Einer dieser Parameter ist die elektrische Stabilität der Vieldrahtproportionalkammern. Dabei ist es wichtig, dass es nicht zu Entladungen an den Drahtebenen der Vieldrahtproportionalkammern kommt, da dies zu einem Abschalten der Hochspannungsversorgung führt. Dies hängt stark von der verwendeten Gasmischung ab. Um die Abhängigkeit der elektrischen Stabilität von der Gasmischung zu bestimmen, können systematische Tests im Labor an einem Testaufbau durchgeführt werden. Im Rahmen dieser Arbeit werden solche Stabilitätstests durchgeführt, um die optimale Gasmischung für den Betrieb der TPC im

ALICE-Experiment zu finden.

Die Arbeit gliedert sich wie folgt. Zu Beginn werden die theoretischen Grundlagen für das ALICE-Experiment erläutert. Im darauffolgenden dritten Kapitel wird das ALICE-Experiment und der experimentelle Testaufbau am Institut für Kernphysik Frankfurt (IKF) vorgestellt. In Kapitel vier werden schließlich die Ergebnisse der Stabilitätstests präsentiert und diskutiert.

2 Grundlagen

2.1 Standardmodell

Das Standardmodell der Elementarteilchenphysik wurde in den 1970ern entwickelt und beschreibt die Wechselwirkung zwischen den kleinsten Bausteinen der Materie, den Elementarteilchen. Man nennt sie elementar, da sie sich nicht weiter teilen lassen. Die Wechselwirkung wird durch vier Grundkräfte vermittelt: die starke Kraft, die schwache Kraft, die elektromagnetische Kraft und die Gravitation. Lediglich die Gravitation kann (noch) nicht ins Standardmodell integriert werden, da sie, im Vergleich zu den anderen drei Kräften, auf elementarer Ebene keine Auswirkung hat [Per00].

Es gibt im Standardmodell nur eine kleine Zahl elementarer Teilchen: sechs Leptonen, sechs Quarks, die Austauschteilchen der Wechselwirkungen und die jeweiligen Antiteilchen. Davon lassen sich Leptonen und Quarks nach ihrer elektrischen Ladung und der sogenannten Generation einteilen (siehe Tabelle 2.1). Zu einer Leptonenfamilie gehört dabei immer ein einfach negativ geladenes Teilchen (Elektron e , Myon μ , Tau τ) und ein ungeladenes Teilchen, das Neutrino ν (Elektron-Neutrino ν_e , Myon-Neutrino ν_μ , Tau-Neutrino ν_τ) [Gri08].

Auch die sechs Quarksorten u (*up*), d (*down*), c (*charm*), s (*strange*), t (*top*) und b (*bottom*), die auch als *flavor* bezeichnet werden, lassen sich nach dem gleichen Prinzip wie die Leptonen ordnen (siehe Tabelle 2.1). Sie tragen aber kein ganzzahliges Vielfaches, sondern nur einen Bruchteil ($+\frac{2}{3}$, $-\frac{1}{3}$) der Elementarladung. Um nun aus den Quarks Teilchen zusammensetzen, die eine ganzzahlige elektrische Ladung tragen, gibt es mehrere Möglichkeiten. Entweder, man fügt drei Quarks zu einem Baryon, wie zum Beispiel dem Proton (uud), oder ein Quark und ein Antiquark zu einem Meson zusammen. Allgemein nennt man Teilchen, die aus Quarks aufgebaut sind, Hadronen [Stö05].

Leptonen und Quarks haben einen Eigendrehimpuls, den Spin, von $\frac{1}{2}$ und zählen deshalb zu den Fermionen, den Teilchen mit halbzahligem Spin. Teilchen mit ganzzahligem Spin nennt man Bosonen [Stö05].

Zu jeder Wechselwirkung, die im Standardmodell beschrieben werden kann, gehört ein oder ein Satz von Austauschteilchen. Das Gluon (starke), W^+ , W^- , Z (schwache) und das Photon (elektromagnetische) haben Spin 1 und gehören somit zu den Bosonen.

Im Alltag begegnet man am häufigsten dem Photon oder γ , also der elektromagnetischen Wechselwirkung, denn das Licht besteht aus reellen Photonen und gehört somit zu den elektromagnetischen Phänomenen. Aber nicht nur im sichtbaren Bereich, sondern

Tabelle 2.1: Ordnungsschema für Quarks und Leptonen nach elektrischer Ladung und Generation. Nach [Gri08, Per00].

Generation	I	II	III	Ladung
Quarks	u	c	t	$+2/3$
	d	s	b	$-1/3$
Leptonen	e	μ	τ	-1
	ν_e	ν_μ	ν_τ	0

auch beim Aufbau von Atomen und Molekülen und in intermolekularen Verbindungen spielt die elektromagnetische Kraft die entscheidende Rolle. Sie prägt somit den Aufbau der Materie auf makroskopischen Skalen maßgeblich.

Geht man zu kleineren Maßstäben über, dominieren die starke und die schwache Kraft. Als typisches Beispiel für einen Prozess der schwachen Wechselwirkung gilt der β -Zerfall, wobei ein Neutron unter Aussendung eines Elektrons und eines Elektron-Antineutrinos in ein Proton übergeht und sich der Quarkinhalt der beteiligten Baryonen ändert. Im Gegensatz dazu erhält die starke Wechselwirkung die *flavor* und bindet Quarks zu Hadronen, aber auch die Nukleonen im Kern. Auf die starke Wechselwirkung soll nun genauer eingegangen werden [Per00].

2.2 Starke Wechselwirkung

Die starke Wechselwirkung hält die Quarks in Baryonen und Mesonen und auch die Nukleonen im Atomkern durch den Austausch von Gluonen zusammen, ähnlich der Bindung von Elektronen an den Atomkern durch den Austausch von Photonen bei der elektromagnetischen Kraft. Im Gegensatz zu den elektrisch ungeladenen Photonen tragen die Gluonen aber selbst eine starke Ladung, die sogenannte Farbe. Diese Farbladung hat in der starken Wechselwirkung die gleiche Aufgabe wie die elektrische Ladung bei der elektromagnetischen Kraft. Da die starke Kraft sowohl an Quarks als auch an Gluonen koppelt, müssen also auch beide eine Farbladung tragen. Diese tritt nicht, wie in der elektromagnetischen Wechselwirkung, als Plus und Minus, sondern beispielsweise als Rot r , Grün g und Blau b beziehungsweise den entsprechenden Antifarben auf. In der Natur kombinieren sich die verschiedenen Farben immer so, dass nur farblose Objekte beobachtet werden. Dies geht als Bedingung in die QCD, die Theorie der starken Wechselwirkung, ein [Pov06]. Die QCD beschreibt die starke Wechselwirkung durch folgendes Quark-Antiquark Potential:

$$V_s = -\frac{4}{3} \frac{\alpha_s}{r} + kr \quad (2.1)$$

Der lineare Teil des Potentials sorgt bei großen Abständen r dafür, dass dem System immer mehr Energie zugeführt werden muss, um die Quarks noch weiter voneinander zu

entfernen, sodass, bevor die Quarks getrennt werden, genügend Energie zur Verfügung steht, um ein neues, gebundenes Quark-Antiquark-Paar zu erzeugen. Man kann Quarks also nicht aus ihrem Verbund herauslösen. Dieses Verhalten nennt sich *Confinement* (englisch: *to confine* = einsperren). Bei kleinen Abständen dominiert der $1/r$ -abhängige Teil und es lässt sich ein weiteres Phänomen der QCD beobachten, die asymptotische Freiheit. Sie zeigt sich in der r -Abhängigkeit der starken Kopplungskonstante α_s , die mit dem Abstand ansteigt. Bei kleinen r allerdings nimmt α_s so stark ab, dass die Quarks und Gluonen als quasifreie Teilchen angesehen werden können. Aus den Eigenschaften der QCD lässt sich herleiten, dass unter bestimmten Bedingungen ein Übergang der nuklearen Materie zum sogenannten Quark-Gluon-Plasma stattfindet, in dem sich Quarks und Gluonen frei bewegen können [Per00].

2.3 Quark-Gluon-Plasma

Der Übergang zum QGP tritt erst bei einer Energiedichte ε_{QGP} auf, die um eine Größenordnung über der Energiedichte der normalen Kernmaterie ε_{nm} liegt [Yag05].

$$\varepsilon_{QGP} \approx 1,2 \frac{\text{GeV}}{\text{fm}^3} \gg \varepsilon_{nm} \sim 0,15 \frac{\text{GeV}}{\text{fm}^3} \quad (2.2)$$

Diese hohen Energiedichten können durch die Änderung zweier Parameter erzeugt werden, der Baryondichte oder der Temperatur. Presst man eine bestimmte Anzahl an Baryonen immer weiter zusammen, fangen diese an, sich zu überlappen, bis ab einer kritischen Dichte die einzelnen Baryonen nicht mehr zu unterscheiden sind und sich die Quarks und Gluonen frei im neu entstandenen Medium, dem QGP, bewegen können. Alternativ kann zum Erreichen der hohen Energiedichten eine bestimmte kritische Temperatur überschritten werden. Betrachtet man ein begrenztes Volumen und erhöht darin die Temperatur, entstehen aus dem Vakuum immer mehr Quark-Antiquark-Paare, bis auch diese sich wieder überlappen und ein QGP bilden [Yag05].

In der Natur findet man diese extremen Bedingungen äußerst selten. Ein mögliches Beispiel stellen Neutronensterne dar, in deren Inneren die Materie dicht genug zusammengedrückt werden könnte, um ein QGP zu erzeugen. Aber auch in einem frühen Stadium des Universums, in dem die Temperatur noch entsprechend hoch war, könnte ein QGP vorgelegen haben.

Um diesen außergewöhnlichen Materiezustand unter Laborbedingungen genauer erforschen zu können, nutzt man große Beschleunigeranlagen, die in Teilchenkollisionen ausreichend Energie zur Erzeugung eines QGP bereitstellen. Am LHC zum Beispiel werden Blei-Ionen auf Geschwindigkeiten nahe der Lichtgeschwindigkeit beschleunigt und bei einer Schwerpunkts-Energie von 2,76 TeV zur Kollision gebracht. Dabei entstehen Energiedichten, die so hoch sind, dass ein QGP erzeugt werden kann. Der LHC-Beschleuniger und das in dieser Arbeit betrachtete Experiment, ALICE, werden in Kapitel 3 genauer

erläutert [Yag05].

3 Experiment

Im folgenden Kapitel werden der LHC, ein Beschleunigerring am europäischen Kernforschungszentrum CERN¹ in Genf, und das ALICE Experiment beschrieben. Insbesondere wird auf die TPC, den wichtigsten Detektor von ALICE, genauer eingegangen, dessen Eigenschaften im weiteren Verlauf dieser Arbeit eingehender untersucht werden. Anhand der TPC wird der prinzipielle Aufbau einer Spurendriftkammer und einer Vieldrahtproportionalkammer (englisch: *Multi-Wire Proportional Chamber* (MWPC)) erläutert. Außerdem werden der Aufbau für Experimente mit Vieldrahtproportionalkammern am IKF und dessen einzelne Bestandteile näher beschrieben.

3.1 LHC

Die Geschichte des LHC begann bereits im März 1984 mit ersten Plänen und Studien zur Realisierbarkeit und nach Jahrzehnten der Vorbereitung fanden Ende 2009 schließlich erste Kollisionen statt. Der mit 26,7 km Umfang zur Zeit größte Teilchenbeschleuniger der Welt erreicht dabei eine Kollisionsenergie von bis zu 8 TeV für Proton-Proton-Stöße und 2,76 TeV pro Nukleon für Blei-Blei-Stöße. Dabei werden die jeweiligen Teilchen gegenläufig in zwei getrennten Röhren tief unter der Erde beschleunigt und an mehreren definierten Punkten zur Kollision (daher der Name *Collider*) gebracht. In Zukunft sollen die Energien am LHC nochmals erhöht werden, sodass die Teilchen bei einer Kollisionsenergie von 14 TeV aufeinander treffen. An den Kollisionspunkten stehen in großen Gewölben die Experimente des LHC: ATLAS, CMS, ALICE und LHCb [Bre09]. Im nächsten Kapitel wird auf ALICE und dessen Detektoren genauer eingegangen.

3.2 ALICE

ALICE widmet sich als einziges der großen Experimente am LHC primär Schwerionen-, insbesondere Blei-Blei-Kollisionen. Dabei liegt der Fokus des Experiments auf der Untersuchung von Eigenschaften der QCD, insbesondere des QGPs. Dank der Kombination verschiedener Detektoren mit unterschiedlichen Eigenschaften kann die Vielzahl der in einer Kollision produzierten Teilchen (es entstehen über 8000 neue Teilchen) identifiziert

¹ *Conseil Européen pour la Recherche Nucléaire*: Diese Abkürzung beschreibt im eigentlichen Sinne nur den Namen des Rats (*Conseil*), der für die Gründung der europäischen Organisation für Kernforschung zuständig war, wurde aber auch danach beibehalten.

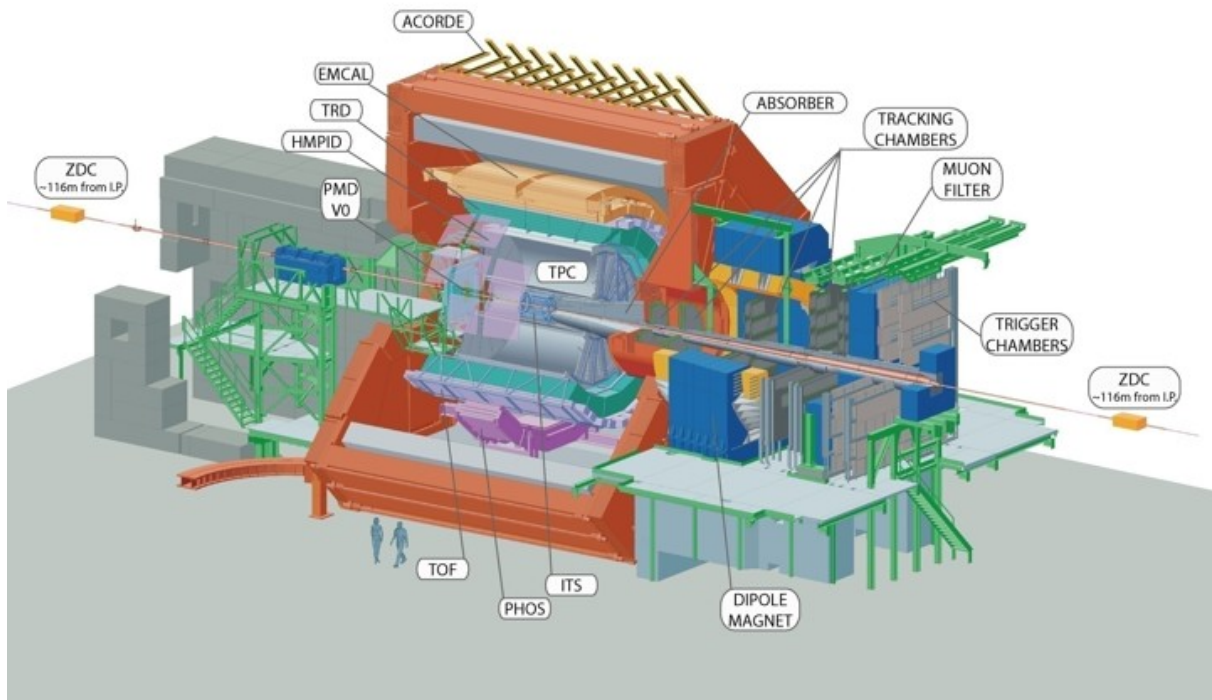


Abbildung 3.1: Schematischer Aufbau des ALICE-Experiments mit den wichtigsten Detektoren. [Nof10]

werden. Aufgrund der im Vergleich zu anderen Experimenten hohen Ortsauflösung des Detektorsystems können die Teilchenspuren sehr genau vermessen und somit gut getrennt werden, was eine genaue Bestimmung der Eigenschaften der Teilchen ermöglicht.

Abbildung 3.1 zeigt den schematischen Aufbau von ALICE. Den zentralen Teil des Experiments bildet ein 16 m großer Solenoid, ein zylindrischer Elektromagnet mit einem homogenen Magnetfeld entlang der Achse, in dessen Innerem sich die verschiedenen Detektoren zur Spurauflösung und Teilchenidentifizierung befinden. Im Feld des Magneten können die Spurdetektoren, bestehend aus dem *Inner Tracking System* (ITS), der TPC und dem *Transition Radiation Detector* (TRD), anhand der Krümmung der Bahnen geladener Teilchen deren Impuls bestimmen und sie durch eine Messung des Energieverlusts identifizieren. Dabei helfen die Detektoren *Time Of Flight* (TOF) und *High Momentum Particle Identification Detector* (HMPID), die eine Teilchenidentifizierung auf größeren Energieskalen möglich machen. Die im zentralen Zylinder am weitesten außen liegenden Detektoren, die Kalorimeter *Photon Spectrometer* (PHOS) und *Electromagnetic Calorimeter* (EMCal), messen den Ort und die Energie von elektromagnetisch wechselwirkenden Teilchen wie Elektronen und Photonen. [Bre09]

3.3 ALICE-TPC

Die TPC, der größte und wichtigste Spurdetektor bei ALICE, misst und rekonstruiert mit hoher Präzision und in drei Dimensionen die Spuren, die geladene Teilchen in seinem mit Gas gefüllten Driftvolumen hinterlassen. Dieses wird, wie in Abbildung 3.2 zu sehen ist, durch eine Hochspannungselektrode und die Auslekammern begrenzt. Bevor auf den genauen Aufbau der ALICE-TPC eingegangen wird, soll kurz die allgemeine Funktionsweise einer Spurendriftkammer vorgestellt werden.

3.3.1 Allgemeine Funktionsweise

Ultrarelativistische geladene Teilchen, wie sie in hochenergetischen Blei-Blei-Kollisionen entstehen, ionisieren beim Durchgang durch das Gas der Spurendriftkammer dessen Atome und hinterlassen so eine Spur aus Ionen und Elektronen. Die schweren Ionen bleiben als Raumladung im Driftvolumen und bewegen sich nur langsam zur negativen Elektrode, wohingegen die viel leichteren Elektronen durch das hohe elektrische Feld zur Ausleseebene beschleunigt und dort durch Vieldrahtproportionalkammern detektiert werden. Eine Segmentierung der Auslekammern ergibt dabei eine zweidimensionale Projektion der Teilchenspur. Da die Elektronen im Gas eine konstante Driftgeschwindigkeit annehmen, wird durch die Messung ihres zeitlichen Auftreffens auf der Ausleseebene eine Bestimmung der noch fehlenden dritten Dimension der Teilchenspur möglich. Mit einer TPC lässt sich so eine dreidimensionale Rekonstruktion der Teilchenspur erzeugen.

Wird zusätzlich zum elektrischen Feld auch noch ein magnetisches Feld, wie zum Beispiel bei ALICE, angelegt, kann aus der Krümmung der Spur der Impuls des Teilchens bestimmt werden. Zusammen mit einer Messung des Energieverlusts (siehe unten), die mit einer TPC auch möglich ist, lässt sich dann die Art des Teilchens, also seine Masse, bestimmen.

Neben einer hohen Homogenität des elektrischen Feldes, die von einem Feldkäfig gewährleistet wird, spielen bei der Detektion der Teilchenspuren die Auslekammern die wichtigste Rolle. Die verwendeten MWPCs registrieren die Signale und bestehen, wie der Name sagt, aus mehreren Lagen parallel gespannter Drähte. Abbildung 3.3 zeigt den Aufbau einer MWPC mit segmentierter Padebene.

Die Kathodendrahtebene begrenzt zusammen mit der Hochspannungselektrode das Driftvolumen (siehe Abbildung 3.2). Dazwischen liegt parallel zur Kathode das sogenannte Schaltgitter oder *gating grid*, das mit seinen zwei Modi, offen und geschlossen, bestimmt, ob eine Datennahme möglich ist. Die Drähte passen sich entweder genau dem Potentialverlauf des Driftfelds an (offen) und sind somit für die geladenen Teilchen praktisch nicht vorhanden oder nehmen alternierend eine größere oder kleinere Spannung an (geschlossen). Dadurch verlaufen die Feldlinien dann nicht mehr von der Hochspannungselektrode bis zur Kathode, sondern enden auf den Drähten des *gating grids*, wodurch weder Elektro-

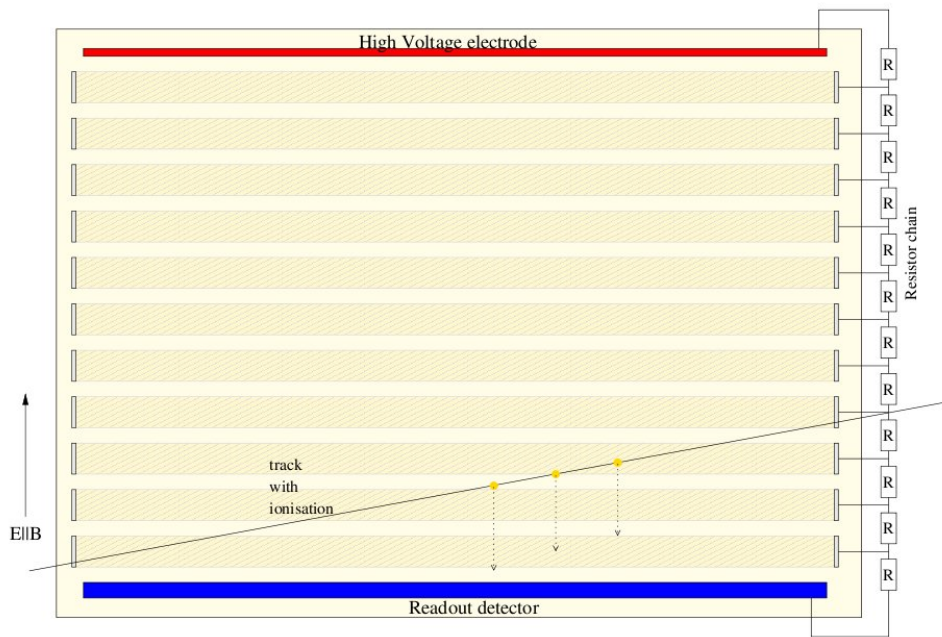


Abbildung 3.2: Darstellung einer Teilchenspur in einer TPC mit Hochspannungselektrode oben und Auslese unten. Die Spannungsteiler in Form einer Widerstandskette sind rechts angedeutet. [Wie08]

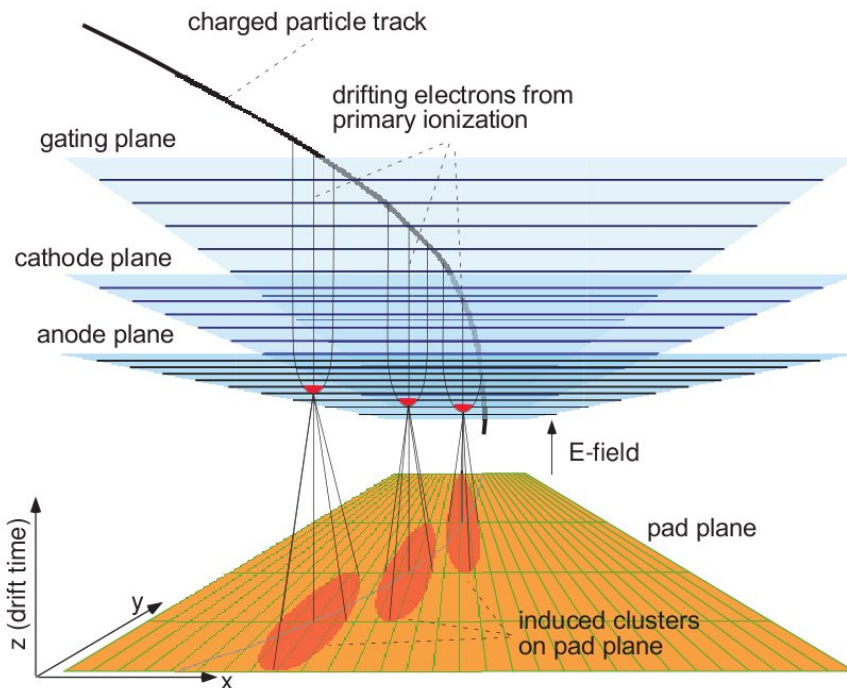


Abbildung 3.3: Erzeugung eines Signals in einer Vieldrahtproportionalchamber mit segmentierter Padebene. [Wie08]

nen zur Kathode, noch Ionen in das Driftvolumen gelangen können. Das hat den Vorteil (und dafür wurde es auch konzipiert), dass sich im Driftvolumen keine Raumladung sammeln und so die Homogenität der Feldlinien stören kann. Zusätzlich können aber auch keine weiteren Spuren detektiert werden, da die für die Detektion maßgeblichen Elektronen auf dem *gating grid* gesammelt werden. Um registriert zu werden, müssten sie bis zur letzten der drei Drahtebenen vordringen, der Anodenebene. Dort werden die Elektronen durch eine hohe Spannung und das daraus resultierende elektrische Feld so stark beschleunigt, dass es zu einer Lawinenbildung kommt. Dabei nehmen die Elektronen zwischen zwei Stößen genügend Energie auf, um weitere Gasatome zu ionisieren und somit auch weitere Elektronen zu erzeugen. Für diese wiederum gilt dann das Gleiche und es kommt zu einer lawinenartigen Vermehrung der Elektronen, deren Stärke proportional zur primären Ionisation ist. Dadurch kann durch die Zahl der ankommenden Elektronen und der daraus resultierenden Signalhöhe auf die von den geladenen Teilchen deponierten Energie zurückgeschlossen werden. Dies macht eine Messung des Energieverlusts der Teilchen und somit, wie bereits beschrieben, eine Identifizierung der Teilchen möglich. Das Signal wird dabei von der sogenannten Padebene aufgenommen.

Die an der Anode entstehende Elektronenlawine fließt aufgrund der größeren Mobilität schnell ab und die zurückbleibenden Ionen induzieren eine Gegenladung auf den segmentierten Pads, sodass durch eine Gewichtung des Signals eine zweidimensionale Koordinate ermittelt werden kann. Die auf den Pads registrierten Signale werden dann durch die nachgeschaltete Elektronik bearbeitet und in ein digitales Format gebracht, das sich zur späteren Analyse speichern lässt. [Wie08]

3.3.2 Aufbau der ALICE-TPC

Das zylindrische Volumen der ALICE-TPC liegt symmetrisch um die Strahlachse und ist mit einer Länge von 5 m, einem inneren Radius von ungefähr 61 cm und einem äußeren Radius von 278 cm zur Zeit eine der größten TPCs der Welt. Sie besteht aus insgesamt vier Zylindern mit unterschiedlicher Funktion. Zwei Sicherheitsbehälter (englisch: *containment vessel*), innen und außen, trennen die TPC thermisch und elektrisch vom ITS beziehungsweise TRD ab und der innere und äußere Feldkäfig sorgt mit einer Reihe von Spannungsteilern für ein hohes, sehr homogenes elektrostatisches Feld. Dieses Feld wird durch eine zentrale Elektrode, die das Volumen der TPC symmetrisch in zwei Hälften teilt, und Auslekammern auf den Endplatten der beiden Detektorseiten begrenzt. Das ebenfalls an den Enden befindliche Unterstüzungsrads (englisch: *service support wheel*) trägt dabei das Gewicht der Elektronik und entlastet und stabilisiert so die Kammern. Abbildung 3.4 zeigt den prinzipiellen Aufbau der ALICE-TPC, ohne Feldkäfig und die Ausleseelektronik.

Die Auslekammern verteilen sich im Unterstüzungsrads auf 18 gleiche Sektoren, die jeweils noch in einen inneren und äußeren Ring unterteilt sind. Daraus ergibt sich, dass

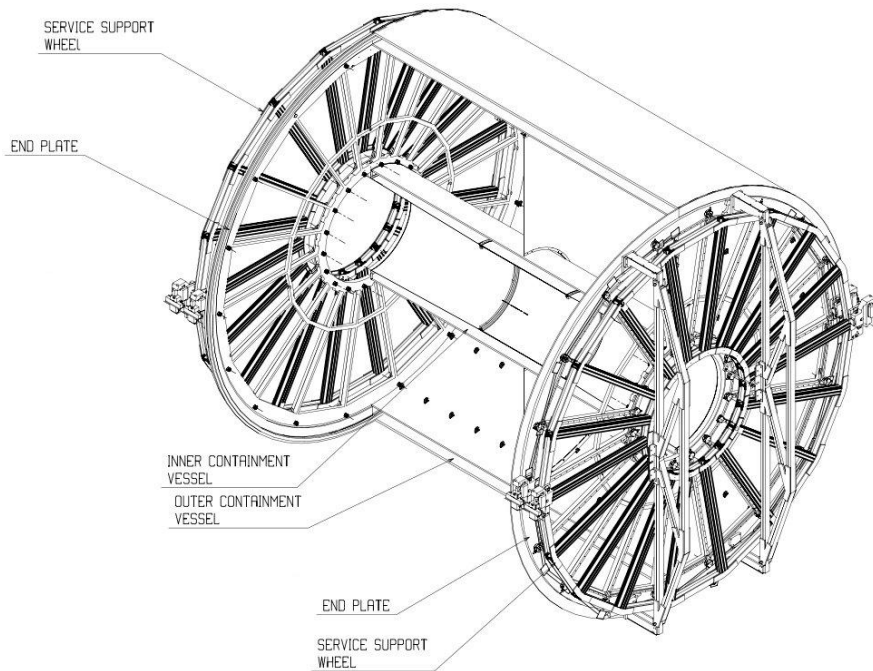


Abbildung 3.4: Dreidimensionale schematische Darstellung der tragenden Strukturen der ALICE-TPC. Innerer und äußerer Sicherheitsbehälter (*inner/outer containment vessel*) sind zur besseren Sichtbarkeit nur halb abgebildet. [Bre09]

insgesamt 72 MWPCs benötigt werden: 36 an jeder Seite beziehungsweise zwei in jedem Sektor. Da die Teilchenspuren nah am Kollisionspunkt am dichtesten zusammenliegen, haben die Kammern im inneren Ring (englisch: *Inner Readout Chamber (IROC)*) einen geringfügig anderen Aufbau als die Kammern im äußeren Ring (englisch: *Outer Readout Chamber (OROC)*).

Den Unterschied im Aufbau der beiden Kammertypen kann man in Abbildung 3.5 sehen. Der Abstand zwischen Kathode, Anode und Pads beträgt bei IROCs jeweils 2 mm, bei OROCs 3 mm, was dazu führt, dass die entstehende Elektronenlawine und somit auch das Signal breiter wird. Um dieses breitere Signal zu detektieren, reichen nun auch etwas größere, dafür aber weniger Pads als bei den IROCs aus. Die geänderte Geometrie kommt also auch mit weniger Ausleseelektronik aus (jedes Pad muss einzeln ausgelesen werden). Diese stellt den größten Kostenfaktor dar und ist deshalb der Hauptgrund der Umstellung. Für beide Kammerarten werden für die Kathode und das Schaltgitter Drähte aus Kupfer und Beryllium mit einem Durchmesser von 75 μm verwendet. Auch die Anode besteht bei beiden Kammertypen aus den gleichen Drähten, gold ummantelten Wolframdrähten mit einem Durchmesser von 20 μm . [ALI10]

3.3.3 Gasmischung

Die Auswahl des Gases für eine TPC muss immer an die Anforderungen des jeweiligen Experiments angepasst werden. Die eine, richtige, allgemein anwendbare Gasmischung

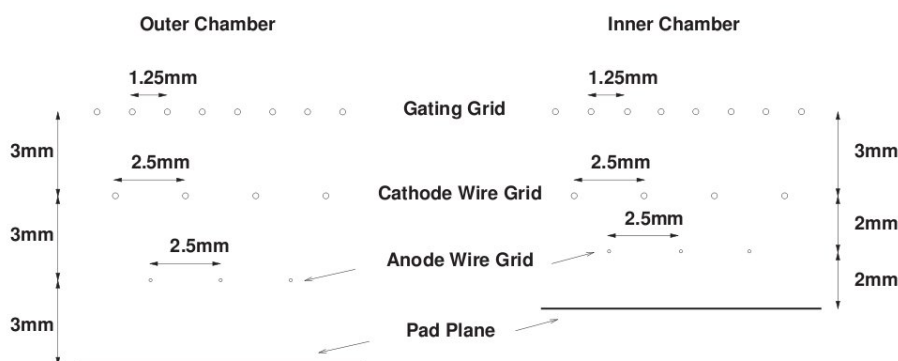


Abbildung 3.5: Schematischer Aufbau der beiden Kammertypen der ALICE-TPC. Der Unterschied zwischen den Kammern im inneren und äußeren Ring besteht im Abstand der Kathoden-, Anoden- und Padebene untereinander. [ALI10]

gibt es nicht. Kommt es auf eine hohe Präzision an, liegt der Schwerpunkt eher auf einer geringen Diffusion, der Stabilität in Bezug auf die Änderung äußerer Parameter wie Temperatur und Druck und einer hohen Ionisationsrate. Dagegen wird ein schnelles Gas mit hoher Ionenmobilität und geringen Alterungseffekten wichtig, wenn es sich um ein Experiment mit einer hohen Kollisionsrate handelt. Die bei der Wahl eines Driftgases relevanten Eigenschaften werden im Folgenden erläutert.

Driftgeschwindigkeit Elektronen nehmen nach kurzer Zeit durch verschiedene Wechselwirkungen mit dem Gas eine konstante Geschwindigkeit an. Von ihr hängt die maximale Driftzeit der Elektronen zur Auslese und somit die Zeit, in der die TPC nicht messen kann, die sogenannte Totzeit, ab. Da diese möglichst gering sein soll, werden Gase mit hoher Driftgeschwindigkeit bevorzugt.

Diffusion Als Diffusion bezeichnet man die Auffächerung einer Elektronenwolke als Funktion der Zeit. Eine geringe Diffusion spielt daher für die Ortsauflösung und auch für die Wahl des Gases eine große Rolle.

Townsend-Koeffizient Der Townsend-Koeffizient beschreibt die Anzahl neuer Ladungsträger pro Wegstrecke, die in einem Gas erzeugt werden. Grundsätzlich haben mehr Ladungsträger eine positive Auswirkung auf die Genauigkeit der Orts- und Energiemessung.

Anlagerungskoeffizient Auf dem Weg zur Kathode müssen die Elektronen eine relativ lange Strecke durch das Gas zurücklegen. Dabei kann es zu Anlagerung der Elektronen an die Gasatome kommen, was die Ortsauflösung negativ beeinflusst.

Ionenmobilität Eines der größten Probleme bei hohen Kollisionsraten stellt die Verzerrung der Driftfeldlinien durch Raumladung dar. Durch eine höhere Ionenmobilität verlassen die Ionen schneller das Driftvolumen, was zu einer besseren Homogenität führt.

Ionisationsrate Ebenso wie der Townsend-Koeffizient sorgt eine höhere Ionisationsrate für mehr Primärionisationen und hat deshalb vergleichbare Vor- und Nachteile.

Gain Als *Gain* bezeichnet man das Verhältnis von den primär erzeugten zu den an der Anode ankommenden Ladungen. Dabei spielt vor allem die Gasverstärkung eine große Rolle.

Dichte Eine hohe Dichte des Gases verursacht eine Verbreiterung des Elektronensignals durch Vielfachstreuung und verschlechtert somit die Auflösung. Eine geringe Dichte wird deshalb bevorzugt.

Sicherheit Aus Sicherheitsgründen kommen bei einem so großen Volumen wie der ALICE-TPC nur Gase zum Einsatz, die weder leicht entflammbar noch giftig sind. Auch radioaktive Gase werden ausgeschlossen.

Edelgase vereinigen die meisten der oben beschriebenen positiven Attribute und haben sich deshalb als Hauptbestandteil für Gasdetektoren etabliert. Von den Edelgasen bleiben aufgrund von Dichte-, Kosten- und Sicherheitsgründen nur Argon (*Ar*) und Neon (*Ne*) übrig. Krypton und Xenon kommen sehr selten vor und sind deswegen teuer. Radon entfällt wegen seiner Radioaktivität. Im Vergleich zu Neon hat Argon eine um einen Faktor vier kleinere Ionenmobilität und wurde deshalb bei ALICE aufgrund der sonst zu großen Raumladungseffekte ausgeschlossen. Als Hauptbestandteil kommt daher nur noch Neon in Frage.

Im Zuge der Gasverstärkung an der Anode der Vieldrahtproportionalkammern werden neben neuen Elektron-Ion-Paaren auch Photonen mit unterschiedlichen Energien erzeugt. Entkommen diese Photonen, die teilweise genug Energie haben, um selbst Gasatome zu ionisieren, aus dem Verstärkungsbereich um die Anode und erzeugen dort neue Elektronen, lösen diese ihrerseits eine Lawine aus. Auch in der zweiten Lawine tritt der gleiche Effekt auf. So kann es zu einer großen Ansammlung an Ladungen und einer nicht erwünschten Funkenentladung kommen. Um die Verursacher, also die Photonen aus der Gasverstärkung, zu unterdrücken, wird dem Edelgas noch ein weiterer Bestandteil beigegeben. Dieses sogenannte Löschgas oder auch *Quencher* hat einen hohen Photoabsorptionskoeffizienten und hindert so die Photonen am Erzeugen neuer Elektronen außerhalb der Verstärkungszone. Als mögliche *Quencher* können organische Verbindungen, wie beispielsweise Methan (CH_4), Ethan (C_2H_6), oder Stickstoffverbindungen (NH_3 , NO), aber auch Kohlenstoffdioxid (CO_2) dienen. Letzteres hat bei hohen Bestrahlungsraten in Bezug auf Alterung und Sicherheit der Drahtkammer die besten Eigenschaften und wird deshalb bei ALICE als *Quencher* genutzt.

Das verwendete Verhältnis der beiden Gase hängt vor allem von der vorgegebenen maximalen Driftzeit der Elektronen und der maximal erreichbaren Feldstärke ab. Der Feldkäfig bei ALICE ermöglicht einen Betrieb bei $400V/cm$, was zu einem optimalen Mischungsverhältnis von 90% *Ne* zu 10% CO_2 führt. Obwohl ein größerer Anteil an CO_2

die Ionisationsrate erhöht, sinkt jedoch gleichzeitig die Driftgeschwindigkeit. Die Driftzeit steigt dabei über die Vorgabe von maximal $90\mu\text{s}$, weshalb nicht mehr als 10% CO_2 verwendet werden kann. [Vee03]

Die Mischung von Ne-CO_2 (90-10) zeigt eine hohe Sensitivität auf das Mischungsverhältnis der beiden Komponenten. Eine Änderung der Anteile führt zu einer Änderung des *Gain*, wodurch es zu einem Durchbruch des Gases (ein Funke schlägt über) kommen kann, was einen relativ hohen Stromfluss zur Anode zur Folge hat. Da zu große Ströme die Hochspannungsversorgung und die angeschlossene Elektronik zerstören können, wird die Hochspannung aus Sicherheitsgründen automatisch heruntergefahren. Das wiederum führt zu unbrauchbaren Daten und unterbricht die Datenaufnahme. Das plötzliche Abschalten der Hochspannungsversorgung durch einen kurzen Strompuls bezeichnet man auch als *Trip*.

Um diese elektrische Stabilität der Ausleseammern bei hohem *Gain* zu erhöhen, wurde der Ne-CO_2 -Mischung 5% Stickstoff (N_2) beigemischt. Es ergibt sich eine Mischung von $\text{Ne-CO}_2\text{-N}_2$ (90-10-5), wobei die Zahlen hier das Verhältnis der jeweiligen Anteile zueinander darstellen und nicht die tatsächlichen Prozentzahlen, da diese zusammen über 100% ergeben würden. Die Auswirkungen der Beimischung von Stickstoff auf die elektrische Stabilität der Kammern soll in der vorliegenden Arbeit anhand einer Testkammer untersucht werden. Der experimentelle Aufbau dazu wird im nächsten Kapitel genauer erläutert. [Gar04]

3.4 IKF-Testaufbau

Der am IKF bestehende Aufbau für Versuche an Drahtkammern nach ALICE-Geometrie umfasst neben der eigentlichen Testkammer das Gehäuse, in der sie untergebracht ist, die nachgeschaltete Elektronik zur Auswertung der Signale sowie die Hochspannungsversorgung für Driftfeld und Anode. Außerdem steht neben einem Gasmischer, mit dem die benötigten Gasgemischungen hergestellt werden können, wenn diese nicht als vorgemischtes Gas vorhanden sind, auch eine Auswahl an radioaktiven Quellen zur Verfügung. Letztere werden im Versuchsaufbau im Labor zur Erzeugung von Teilchenspuren verwendet, um die bei einer Schwerionenkollision entstehenden Spuren zu ersetzen. Im Folgenden werden nun der genaue Aufbau der Testkammer und des Gehäuses sowie die verwendeten elektronischen Bauteile und die Gasversorgung beschrieben. Außerdem wird kurz auf die verwendeten Quellen eingegangen.

3.4.1 Gehäuse

Abbildung 3.6 zeigt die am IKF genutzte Kammer in einer schematischen Darstellung von außen. Die im Folgenden verwendeten Bezeichnungen vorne oder hinten beziehen sich auf die Ausrichtung der Kammer in Abbildung 3.6. Das Gehäuse der Testkammer am IKF

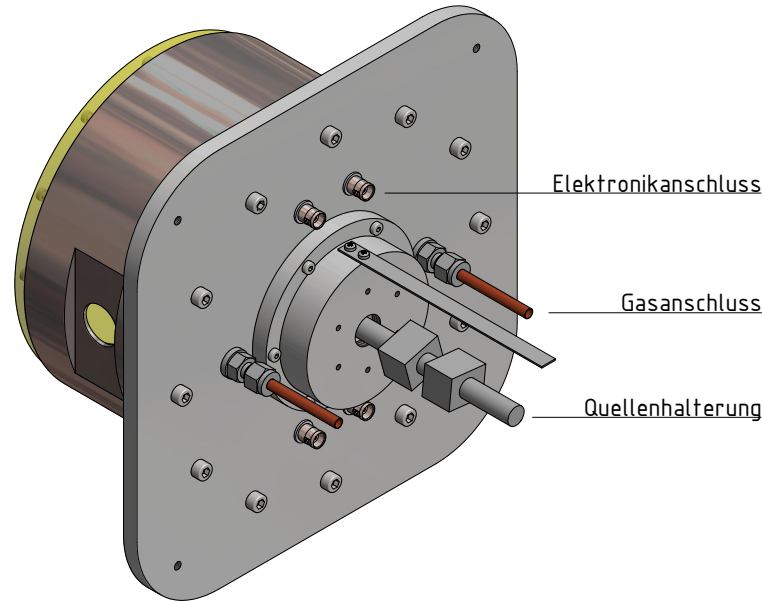


Abbildung 3.6: Schematische Darstellung der am IKF verwendeten Kammer. Ein großer und ein kleiner Zylinder sind an eine Halteplatte geschraubt, in der sich auch die Anschlüsse für die Elektronik und das Gas befinden. Außerdem sieht man die bewegliche Quellenhalterung in der Achse der beiden Zylinder. [Sch14]

besteht aus einer gasdichten zylindrischen Kammer mit zwei kleinen Sichtfenstern an den Seiten, einem Ein- und Ausgang für das Gas und Anschlüssen für die Spannungsversorgung und die Auslese an der Vorderseite. Der Zylinder hat einen inneren Radius von 93 mm, eine Höhe von 100 mm und ist auf eine 10 mm dicke Platte, die als Halterung dient, montiert.

Um eine radioaktive Quelle nutzen zu können, ist ein weiterer, kleinerer Zylinder (Radius: 35 mm; Höhe: 24 mm) auf einem Loch mit 23,5 mm Radius in der Platte befestigt. Im kleineren Zylinder befindet sich ein Stab für eine bewegliche Quellenhalterung, mit der die Entfernung des daran angebrachten Strahlers zur Drahtkammer von außen geregelt werden kann.

Abbildung 3.7 zeigt den Aufbau innerhalb des äußeren Zylinders. Die zur Auslese verwendete Drahtkammer befindet sich mittig an der hinteren Seite des Gehäuses. Die der Quellenhalterung zugewandten Felddrähte haben einen Abstand von 52 mm zur Halterungsplatte. Der Abstand der später daran angebrachten Quelle zur Auslesekammer kann also auch in diesem Intervall von 0 mm bis 52 mm variiert werden.

Zum Ausführen der Signale befinden sich in der Halterungsplatte zwei BNC-Buchsen (Koaxialstecker, die zum Übertragen von Hochfrequenzen von bis zu 1 GHz verwendet werden), die innen an Kathoden- und Padebene gelötet sind. Es lässt sich also neben dem Signal auf dem Pad bei Bedarf auch die Kathode auslesen. Die beiden benötigten Hochspannungen für Driftfeld und Anodengitter werden über zwei SHV-Buchsen (englisch: *Safe*

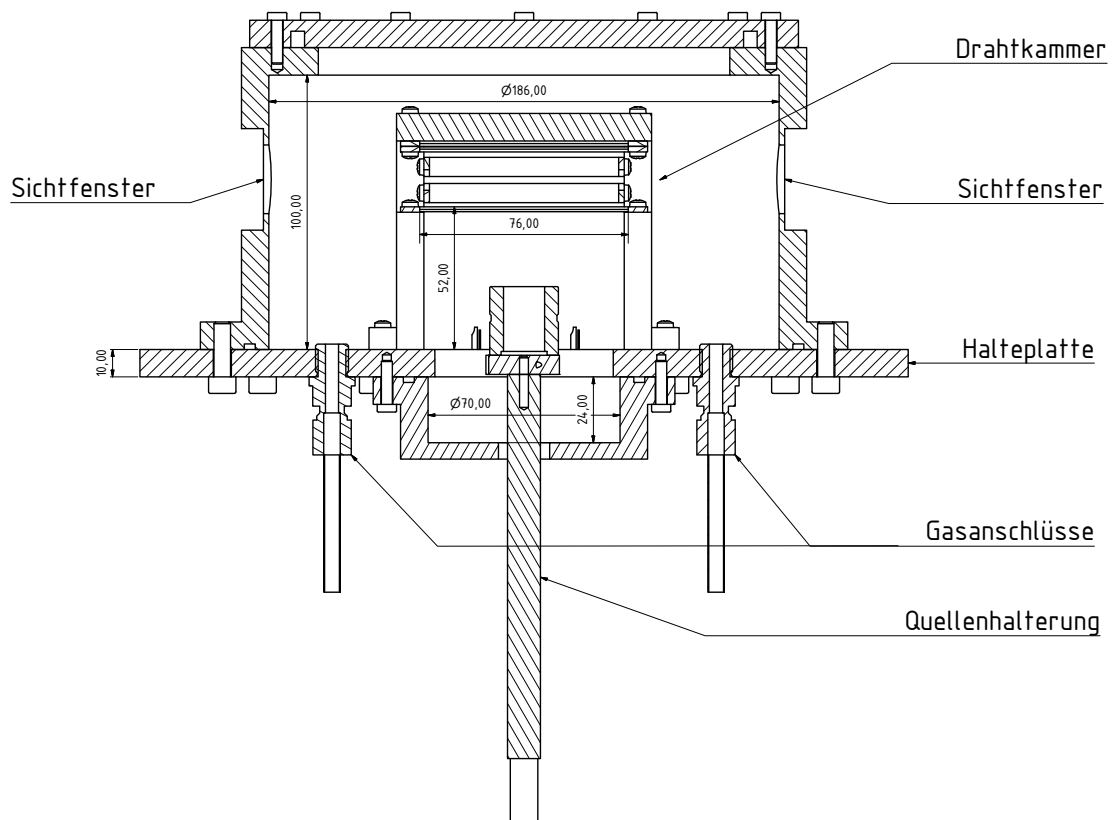


Abbildung 3.7: Querschnitt des verwendeten Aufbaus am IKF. Gut zu sehen ist hier die Position der Drahtkammer innerhalb des Gehäuses. [Sch14]

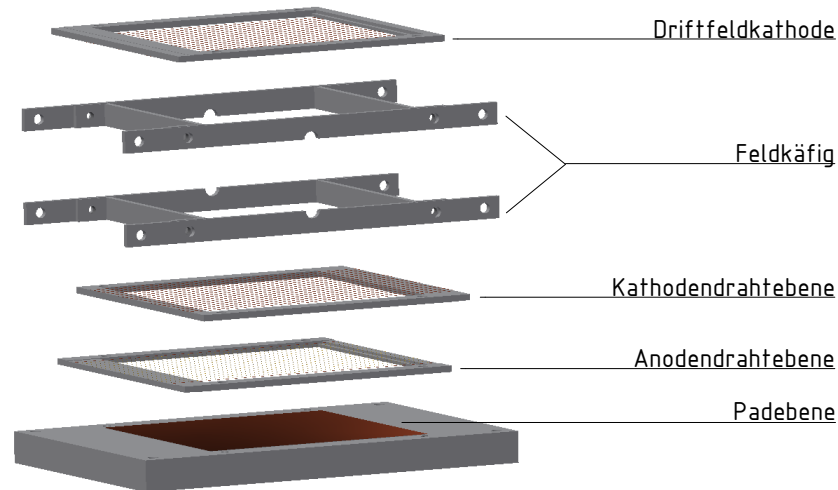


Abbildung 3.8: Explosionszeichnung der verwendeten Drahtkammer im Laboraufbau am IKF. Die Quellenhalterung befindet sich in dieser Ansicht oberhalb der Driftkathode. [Sch14]

High Voltage; Koaxialverbindungen zum sicheren Übertragen von Hochspannungen), die auch in der Halterungsplatte angebracht sind, in die Kammer geleitet. Für eine möglichst dichte Verbindung der Kammer mit der Gasversorgung sorgen zwei Anschlüsse der Firma Swagelok, ebenfalls an der Frontplatte der Kammer neben den vier Elektronik-Buchsen. [Ren13]

3.4.2 Drahtkammer

Abbildung 3.8 zeigt eine Explosionszeichnung der als Auslesekommer genutzten MWPC. Die Drahtkammer sitzt parallel zur Halterungsplatte im äußeren Zylinder, wobei die Quelle, wenn vorhanden, in das Driftvolumen hineinstrahlt. Dieses wird definiert von der Driftkathode auf der dem Strahler zugewandten Seite und der Kathodendrahtebene auf der anderen Seite. Es ergibt sich eine Driftstrecke von 20 mm, die von zwei 7 mm dicken Aluminiumstreifen eingefasst ist, um Inhomogenitäten des angelegten Driftfeldes möglichst gering zu halten. Ein Spannungsteiler verbindet die Aluminiumstreifen und bringt sie so auf das zu einem homogenen Feld passende Potential. Die Verstärkung der erzeugten Elektronen und somit auch die Erzeugung des Signals geschieht auf der weiter von der Quelle entfernten Seite. Da die Quelle aber durch die Feldkathode strahlt, kann bei ausreichender Reichweite der Bereich um die Anode direkt bestrahlt werden.

Der Aufbau der Drahtebenen der MWPC entspricht dem Aufbau einer Drahtkammer nach IROC-Geometrie der ALICE-TPC (siehe Kapitel 3.3), wobei aber auf ein Schaltgitter verzichtet wurde, da die Zerfallsrate einer Laborquelle nicht so hoch ist wie die Produktion geladener Teilchen bei Schwerionenkollisionen. Die Aktivitäten der vorhandenen radioaktiven Quellen liegen typischerweise im Bereich von 10^5 bis 10^9 Bq (siehe

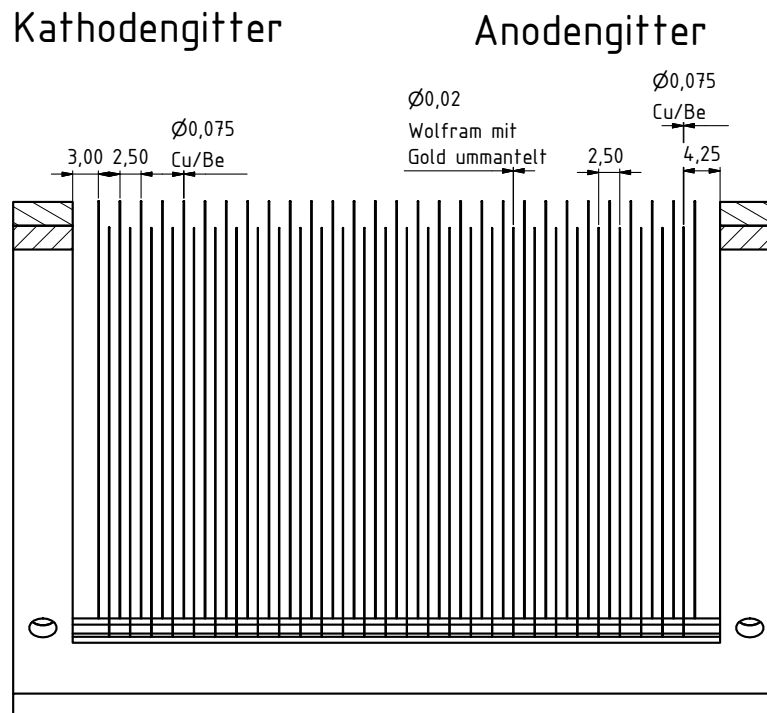


Abbildung 3.9: Abstände und Maße der Anoden- und Kathodenebene der verwendeten Drahtkammer. Jeweils ein Kathodendraht liegt zwischen zwei Anodendrähten. [Sch14]

Kapitel 3.4.3). Die Produktionsrate für geladene Teilchen bei Schwerionenkollisionen erreicht, geht man von 8000 Teilchen pro Kollision und einer Kollisionsrate von 40 MHz aus, Werte von ungefähr 10^{11} . Dies liegt um mehrere Größenordnungen über dem Wert der Aktivität der Laborquellen und rechtfertigt den Aufbau ohne Schaltgitter.

Abbildung 3.9 zeigt die Anordnung und Maße der beiden vorhandenen Drahtebenen. Sowohl Anode als auch Kathode sind auf einem 2 mm dicken Rahmen mit den Innenmaßen 75 mm x 76 mm so in gleicher Ausrichtung befestigt, dass, von oben betrachtet, jeder Anodendraht mittig zwischen zwei Kathodendrähten liegt. Daraus folgt, dass, im Vergleich zu den Anodendrähten, ein Kathodendraht mehr verbaut ist, in diesem Fall 29 75 μm dicke Drähte aus Kupfer und Beryllium. Die 28 Drähte der Anode teilen sich auf in 26 20 μm dicke Drähte aus gold ummanteltem Wolfram und zwei jeweils am Rand befindliche 75 μm dicke Drähte aus Kupfer und Beryllium, die das Risiko einer Entladung aufgrund von Feldverzerrungen an den Rändern verringern sollen.

Außerdem besteht die Ausleseebene, anders als bei ALICE, aus einem einzigen großen Pad, das mit 75 mm x 76 mm die gleichen Ausmaße wie die Drahtebenen hat. Ein einzelnes Pad reicht in der vorhandenen Testkammer aus, da sie zur Untersuchung von Spannungstrips konzipiert wurde und dazu keine exakte Ortsbestimmung nötig ist. Trotzdem besteht die Möglichkeit auch mit diesem einen Pad ein Spektrum, also eine Amplitudenverteilung

der eingehenden Signale, aufzunehmen. [Ren13]

3.4.3 Radioaktive Quelle

Die radioaktiven Quellen werden am Testaufbau genutzt, um Gasteilchen im Driftvolumen der Drahtkammer zu ionisieren und so Signale zu erzeugen. Dies ersetzt die Teilchenkollisionen, die für die Produktion geladener Teilchen bei ALICE sorgen. Als radioaktiver Strahler kann dabei jede Zerfallsart genutzt werden, solange die Zerfallsteilchen mit den Atomen des Detektorgases wechselwirken und so ein Signal erzeugen. Verwendet werden dafür die am IKF vorhandene Eisen- ($Fe-55$) und Americium-Quellen ($Am-241$).

Eisen-55 zerfällt über einen Elektroneneinfang mit einer Halbwertszeit von 2,737 Jahren zu Mangan-55 [NUB03]. Als wahrscheinlichstes Zerfallsteilchen entsteht dabei ein für Eisen charakteristisches Photon mit einer Energie von 5,9 keV. Wegen dieses gut definierten Übergangs und der bekannten Energie des Photons wird die Fe-55-Quelle sehr häufig in Laborversuchen verwendet. Es existieren zwar auch andere Übergänge, diese können jedoch, da sie im Vergleich zum 5,9 keV-Übergang viel seltener sind, vernachlässigt werden. Im Gegensatz zu geladenen Teilchen ionisieren die Photonen die Gasatome nicht entlang einer Spur, sondern an einzelnen Stellen des Driftvolumens. Das bei Auslese entstehende Energiespektrum unterscheidet sich je nach verwendetem Detektorgas. In $Ne-CO_2$ (90-10), beispielsweise, ergibt sich ein einzelner Peak, das heißt ein relativ spitzes Maximum, bei einer Energie von 5,9 keV, dessen Position im Spektrum sich sehr gut bestimmen lässt. In $Ar-CO_2$ (90-10) zeigt sich, neben dem Peak bei 5,9 keV, ein weiterer bei einer etwas niedrigeren Energie von ungefähr 2,9 keV, der als *Argon Escape Peak* bezeichnet wird. Dieser entsteht, wenn das Photon seine Energie nicht in einer einzelnen Ionisation abgibt, sondern zusätzlich noch ein weiteres Photon geringerer Energie mit einer großen mittleren freien Weglänge erzeugt wird. Es besteht dann die Möglichkeit, dass das zweite Photon die Energie aus dem Driftvolumen hinaus trägt und dort erst wieder reagiert, was sich als fehlende Energie im Spektrum und dem *Escape Peak* bemerkbar macht.

Americium-241 geht unter Aussendung eines Helium-Kerns mit einer Halbwertszeit von 432,6 Jahren in Neptunium-237 über [NUB03]. Es handelt sich also um einen α -Strahler. Wie man in Abbildung 3.10 sieht, befinden sich die Übergangsenergien im Bereich um 5,4 MeV. Das entspricht einer um eine Größenordnung größeren Energie als die der Photonen des Fe-55-Zerfalls. Die größere Energie und die Tatsache, dass die α -Teilchen eine Spur im Detektor hinterlassen, entsprechen den experimentellen Bedingungen bei ALICE mehr, als wenn einzelne Gasatome durch die Photonen der Eisen-Quelle ionisiert werden.

Die am IKF verwendeten radioaktiven Quellen tragen zur besseren Identifikation eine interne Bezeichnung. Im Zuge dieser Arbeit werden zwei verschiedene Eisen-Quellen mit unterschiedlicher Aktivität verwendet. Die Quelle mit der Bezeichnung 55.26.08 hat eine Aktivität von $5,30 \times 10^8$ Bq, die Quelle 55.26.09 hat mit $2,94 \times 10^9$ Bq eine um fast

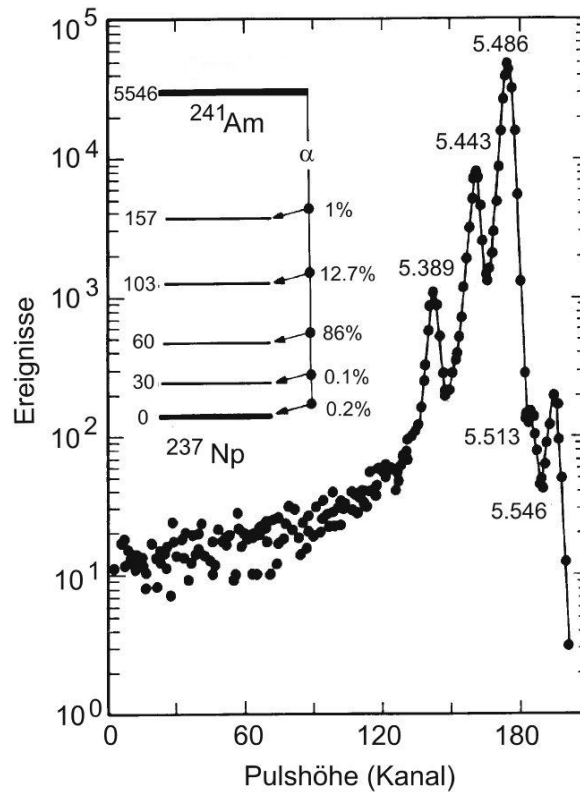


Abbildung 3.10: Spektrum und Termschema des α -Zerfalls von Americium-241. [Bet08]

eine ganze Größenordnung größere Aktivität. Das führt zu einer vergleichsweise hohen Zerfallsrate. Die Zerfallsrate der verwendeten Americium-Quelle ($241.95.30$) dagegen ist um einiges kleiner (1.65×10^5 Bq). Sie deponiert dafür pro Teilchen, wie oben beschrieben, weitaus mehr Energie in der Kammer, da die Zerfallsteilchen mehr Energie besitzen. [Ren13]

3.4.4 Elektronik

Zur Elektronik des Testaufbaus zählen neben der Auslekette zur Darstellung der Signale auf dem Pad auch die Hochspannungsversorgung für das Driftfeld und die Anode. Ein Spannungsgerät der Firma Iseg (Typ NHQ 203M) mit zwei Ausgängen liefert die beiden Hochspannungen, die Schwankungen unterliegen und so einen Untergrund (Signale, die nicht durch Ionisation entstehen) erzeugen können. In der Spannungsversorgung der Anode dient deshalb ein RC-Glied (Kapazitäten: 10 nF, 4,7 nF; Widerstand: 10 k Ω) als Filter zur Unterdrückung vom durch das Spannungsgerät induzierten Untergrund. Zusätzlich misst ein Nano-Amperemeter (*HV Isolated Current Meter*, Typ A310, gebaut an der Universität Heidelberg) den Strom der Anode.

Auf dem Weg des Signals von der Erzeugung an der Anode bis hin zur Auswertung am PC durchläuft es verschiedene Stufen. Das durch die nach der Verstärkung zurückbleibenden Ionen erzeugte analoge Signal auf den Pads wird durch eine steile Anstiegsflanke mit

einer Anstiegszeit von ungefähr 1 ns und einen lang auslaufenden Schwanz charakterisiert. Um weiter verarbeitet werden zu können, wird das Signal in einem ladungsempfindlichen Vorverstärker (Eigenbau der Elektronikabteilung des IKF) so verstärkt, dass es im optimalen Arbeitsbereich des Hauptverstärkers und Pulsformers (Canberra *Amplifier* Typ 2011) liegt. Der Pulsformer wandelt die Form des eingehenden asymmetrischen Signals mit einer Umformzeit von 0,5 μs in eine gaußförmige Kurve, wohingegen der Hauptverstärker die Amplitude des Signals noch weiter verstärkt (Verstärkungsfaktoren: 10, 30, 100, 300, 1000). Beides dient dazu, das Signal in eine Form zu bringen, die für ein Oszilloskop oder einen *Analoge-to-digital Converter* (ADC) nutzbar ist. Als ADC wird ein Vielkanalanalysator mit 8000 Kanälen der Firma Ortec mit einer Umsetzungszeit von weniger als 2 μs verwendet (Typ Easy-MCA-8k) [Ort10]. Der ADC wandelt das bis dahin analoge Signal in ein vom Computer lesbares digitales Format um, das heißt, die analoge, kontinuierliche physikalische Größe (hier die Spannung) wird in eine Reihe von konkreten, also digitalen, Zahlen umgewandelt. Über einen USB-Anschluss kann der ADC mit einem Computer verbunden werden und so die digitalen Signale weitergegeben werden. Eine Auslesesoftware füllt die Signale dann sortiert nach Amplitudenhöhen in ein Histogramm, sodass ein Energiespektrum entsteht [Mus03].

Um Signale und somit ein Amplitudenspektrum zu erzeugen, kann anstatt der Auslese-kammer auch ein Pulser verwendet werden. Die erzeugten Pulse haben eine gut definierte und einstellbare Höhe und können zum Testen der Elektronik zur Verarbeitung der Signale genutzt werden. Der am IKF verwendete Pulser liefert Signale einer bestimmten Höhe mit einer maximalen Ausgangsspannung U_0 . Die Höhe des ausgehenden Pulses kann in $n=9$ Stufen eingestellt werden, wobei die Ausgangsspannung ein Bruchteil U_0/n der Maximalspannung ist. Der Puls hat eine verschwindend geringe Breite und unterscheidet sich so von der Breite der Signale, die geladene Teilchen in der Kammer erzeugen. Diese haben aufgrund von Diffusion immer eine endliche Breite. Die geringe Breite wird dann wichtig, wenn beispielsweise das durch die Elektronik induzierte Rauschen ermittelt werden soll.

3.4.5 Gas

In Kapitel 3.3.3 wurde bereits diskutiert, dass bei ALICE verschiedene Gasmischungen verwendet werden. Während der vergangenen Messperiode des Experiments wurde sowohl $Ne-CO_2-N_2$ (90-10-5) als auch $Ne-CO_2$ (90-10) als Gasmischung verwendet. Deshalb besteht auch die Notwendigkeit, beide Mischungen im Labor nutzen zu können. Da Neon vergleichsweise teuer ist, wurde für die Studien zum Testen der Kammer und der prinzipiellen Funktionstüchtigkeit auch $Ar-CO_2$ (90-10) verwendet.

Die Gasmischungen stehen dabei entweder als von einer externen Firma vorgemischtes Gas in einer Gasflasche bereit oder können je nach Bedarf mit einer Gasmischstation selbst hergestellt werden. Die Gasmischstation besteht aus Teilen der Firma MKS. Vier digitale Gasflussregler des Typs 1179B werden mit einem *Multi Gas Controller* des Typs 647C

angesteuert. Der *Multi Gas Controller* besitzt zur einfacheren Bedienung ein Eingabefeld an der Vorderseite, über das die Flüsse der vier Kanäle einzeln eingestellt werden können [MKS12].

Als reine Gase stehen am IKF Neon, Argon, Kohlenstoffdioxid und Stickstoff in Gasflaschen zur Verfügung. Die Flussregler leiten die Einzelkomponenten im gewünschten Verhältnis in ein Mischvolumen, von wo aus die Gasmischung dann über zwei Anschlüsse weitergeleitet werden kann. Jeder der vier Flussregler des Mischers hat einen bestimmten Messbereich, der typischerweise in sccm (Standardkubikzentimeter pro Minute; das bedeutet bei Normbedingungen mit einem Druck von 1013,25 mbar und einer Temperatur von 0 °C einen Fluss von 1 cm³/min) oder slm (Standardliter pro Minute; bei Normbedingungen: 1 l/min $\hat{=}$ 1000 cm³/min) angegeben wird. Innerhalb dieses Messbereichs lassen sich die Flussregler von 2% bis 100% regeln [MKS04]. In den Mischer am IKF sind drei Flussregler eingebaut, die einen etwas größeren Fluss von 1 l/min erlauben und ein Flussregler mit 10 cm³/min. Dieser Unterschied ist durchaus erwünscht, da die Anteile in den erforderlichen Mischungen, 90% und 10%, um ungefähr eine Größenordnung auseinanderliegen und die Flussregler am Rand ihres Messbereichs am ungenauesten sind. Um die Flussregler auch bei der dreikomponentigen Mischung von *Ne-CO₂-N₂* nicht am Limit ihres Messbereichs betreiben zu müssen (siehe Kapitel 4.2), wurde im Laufe dieser Arbeit noch ein weiterer Flussregler eingesetzt. Dieser hat einen Messbereich von 100 cm³/min und eignet sich somit bestens, zusammen mit den Flussregler mit 1 l/min beziehungsweise 1 cm³/min, die Mischung aus den drei Komponenten *Ne-CO₂-N₂* im Verhältnis 90-10-5 herzustellen.

Zur Kontrolle der Kalibration der vier Kanäle des Mischers wird ein externer Flussmesser der Firma *Agilent Technologies* vom Typ ADM 2000 verwendet. Die vom Mischer ausgehende Gasleitung kann direkt an das Gerät angeschlossen werden, sodass auf der Anzeige des Flussmessers der aktuelle Gasfluss abgelesen werden kann. Die Messung erfolgt in einem der Messbereiche, die vom internen Prozessor dynamisch angepasst werden. Dafür stehen drei Bereiche von 0,50 bis 9,99 ml/min, 10,0 bis 99,9 ml/min und 100 bis 100 ml/min zur Verfügung. Diese umfassen zu einem großen Teil den Messbereich der verschiedenen verwendeten Flussregler im Gasmischer und eignen sich deshalb gut zu einer Überprüfung der Kalibration [Agi14].

4 Messungen

Im folgenden Kapitel sollen Ergebnisse von Versuchen am in Kapitel 3.4 diskutierten Versuchsaufbau vorgestellt werden. Zunächst werden Pulsermessungen zum besseren Verständnis des Einflusses der Elektronik auf das Amplitudenspektrum und zur Bestimmung der Verstärkungsfaktoren des Hauptverstärkers diskutiert. Außerdem werden qualitative und quantitative Stabilitätstests mit den verschiedenen Gasmischungen erläutert und Messungen zur Überprüfung der einzelnen Kanäle des Gasmischers gezeigt.

4.1 Pulsermessungen

Für die im Folgenden beschriebenen Untersuchungen werden die Pulshöhen des Pulsers genutzt. Der Pulser erzeugt, wie in Kapitel 3.4.4 erläutert, Signale, deren Höhe in neun Stufen eingestellt werden können. Nach Formung und Verstärkung durch Vorverstärker, Hauptverstärker und ADC ergeben die bearbeiteten Signale in einem Amplitudenspektrum einen Peak, dessen Position die Amplitude nach Durchlaufen der Elektronik angibt.

4.1.1 Nullverschiebung durch Elektronik

Bevor die Auslekette für quantitative Stabilitätstests verwendet werden kann, muss der Einfluss der Elektronik auf die Signale untersucht werden. Es kann dazu kommen, dass die Signalhöhen insgesamt um einen bestimmten Wert verschoben sind. Dieser Effekt nennt sich Nullverschiebung und muss, falls er eine relevante Höhe erreicht, in der Auswertung berücksichtigt werden. Da die Nullverschiebung abhängig von der verwendeten Elektronik und somit auch von der Verstärkung des Hauptverstärkers ist, muss sie für jede Verstärkereinstellung einzeln bestimmt werden. Für die Messungen sind die Verstärkungsfaktoren 30, 100, 300 und 1000 des Hauptverstärkers relevant. Dies wird in Kapitel 4.1.2 näher erläutert.

Bei einer idealen Elektronik ergibt sich ein linearer Zusammenhang zwischen der Ausgangsspannung des Pulsers und der Amplitude im Amplitudenspektrum, wobei die entstehende Gerade durch den Nullpunkt verläuft. Abbildung 4.1 zeigt die Ergebnisse der Messungen zu den Verstärkungsfaktoren 30, 100, 300 und 1000 des Hauptverstärkers. Die gemessenen Datenpunkte lassen sich gut durch die lineare Funktion $f(x) = ax + b$ beschreiben. Die unterschiedliche Anzahl der Datenpunkte kommt zustande, da bei einem Verstärkungsfaktor von 30 die Amplitudenhöhen zu klein werden, um vom ADC verarbei-

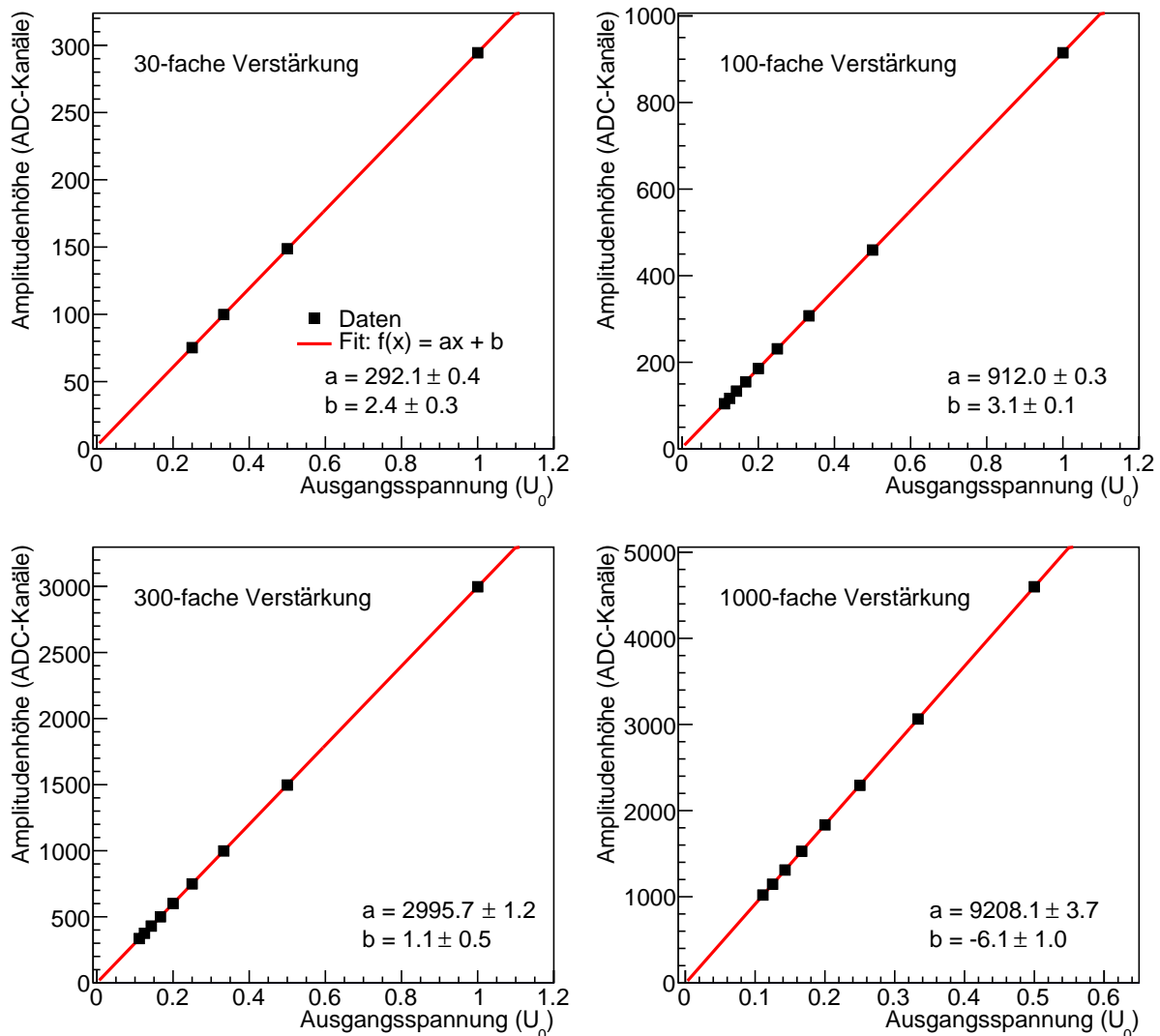


Abbildung 4.1: Nullverschiebung durch die Elektronik und Verstärkungsfaktoren des Hauptverstärkers: Amplitudenhöhe in Abhängigkeit von der Ausgangsspannung des Pulsers für 30-, 100-, 300- und 1000-fache Verstärkung des Hauptverstärkers.

tet zu werden. Bei 1000-facher Verstärkung sind die Signale teilweise zu groß und liegen außerhalb des Arbeitsbereichs des ADC. Die Nullverschiebung b nimmt bei allen vier verwendeten Verstärkungen kleine Werte an, sodass sie bei den weiteren Untersuchungen vernachlässigt werden kann und die Amplitudenhöhen nicht korrigiert werden müssen.

4.1.2 Verstärkungsfaktoren des Hauptverstärkers

Der verwendete ADC hat, wie in Kapitel 3.4.4 erläutert, einen begrenzten Auslesebereich von 8000 Kanälen. Bei einer typischen Stabilitätsmessung beginnt man bei niedriger Anodenspannung und fährt diese dann immer weiter hoch. Auch die Signale werden dabei immer größer und können den sensitiven Bereich des ADC verlassen. Um die verschieden

Tabelle 4.1: Verstärkungsfaktoren zwischen den Stufen des Hauptverstärkers.

30-fach → 100-fach	3,12
100-fach → 300-fach	3,29
300-fach → 1000-fach	3,07

hohen Signale trotzdem mit guter Genauigkeit messen zu können, muss deshalb auch die Verstärkung des Hauptverstärkers so angepasst werden, dass, wenn die Signale zu groß werden, der Verstärkungsfaktor eine Stufe kleiner geschaltet wird. Sollen alle Amplitudenhöhen einer Messung miteinander verglichen werden, muss der Verstärkungsfaktor zwischen den verschiedenen Stufen des Hauptverstärkers bekannt sein.

Zur Bestimmung der Verstärkungsfaktoren können die Ergebnisse der Pulsermessung (vgl. Abbildung 4.1) zur Bestimmung der Nullverschiebung genutzt werden. Da sich bei gleicher Ausgangsspannung am Pulser die Amplitudenhöhe nur durch die Verstärkung am Hauptverstärker ändert, liegt zwischen zwei Amplitudenhöhen verschiedener Verstärkungen aber gleicher Ausgangsspannungen der Faktor, der durch die Verstärkung am Hauptverstärker gegeben ist. Dies gilt für jede PulserEinstellung und somit auch für die Steigung a der Geraden, die den Verlauf der Datenpunkte beschreibt. Das Verhältnis der Steigungen gibt also den Faktor zwischen den Verstärkungsstufen des Hauptverstärkers an. Die Werte der verschiedenen Faktoren sind in Tabelle 4.1 zusammengefasst.

4.2 Gasmischung

Neben einem guten Verständnis der Ausleseelektronik ist es außerdem wichtig, die in der Auslesekammer verwendeten Gasmischungen so genau wie möglich herstellen zu können. Schon eine Abweichung im einstelligen Prozentbereich beeinflusst die Verstärkung der Elektronen und somit die resultierenden Amplitudenhöhen, sodass für vergleichbare Messungen die Gasmischung so genau wie möglich bekannt sein muss.

Erste Messungen mit der Fe-Quelle (siehe Kapitel 3.4.3) zeigten eine Abhängigkeit der Amplitudenhöhen vom absoluten Gasfluss. Dies kann durch eine ungenaue Kalibrierung der verwendeten Flussregler erklärt werden. Um sicherzustellen, dass die Eichung der Flussregler für die benötigten Gasmischungen hinreichend genau ist, werden die einzelnen Kanäle des Gasmischers, also die vier Flussregler, mit dem in Kapitel 3.4.5 beschriebenen Flussmesser von Agilent überprüft. Dabei soll getestet werden, ob die am *Multi Gas Controller* eingestellten Werte für den Gasfluss q_{misch} auch mit dem tatsächlichen Wert q_{mess} übereinstimmen. Dazu werden die beiden Werte in Abbildung 4.2 gegeneinander aufgetragen. Im Idealfall ergibt sich ein linearer Verlauf durch den Ursprung mit einer Steigung von eins, da dann q_{mess} mit q_{misch} absolut übereinstimmt. Um ein bestimmtes Mischungsverhältnis zu erreichen, genügt es, wenn die Kanäle relativ zueinander geeicht sind. Bei

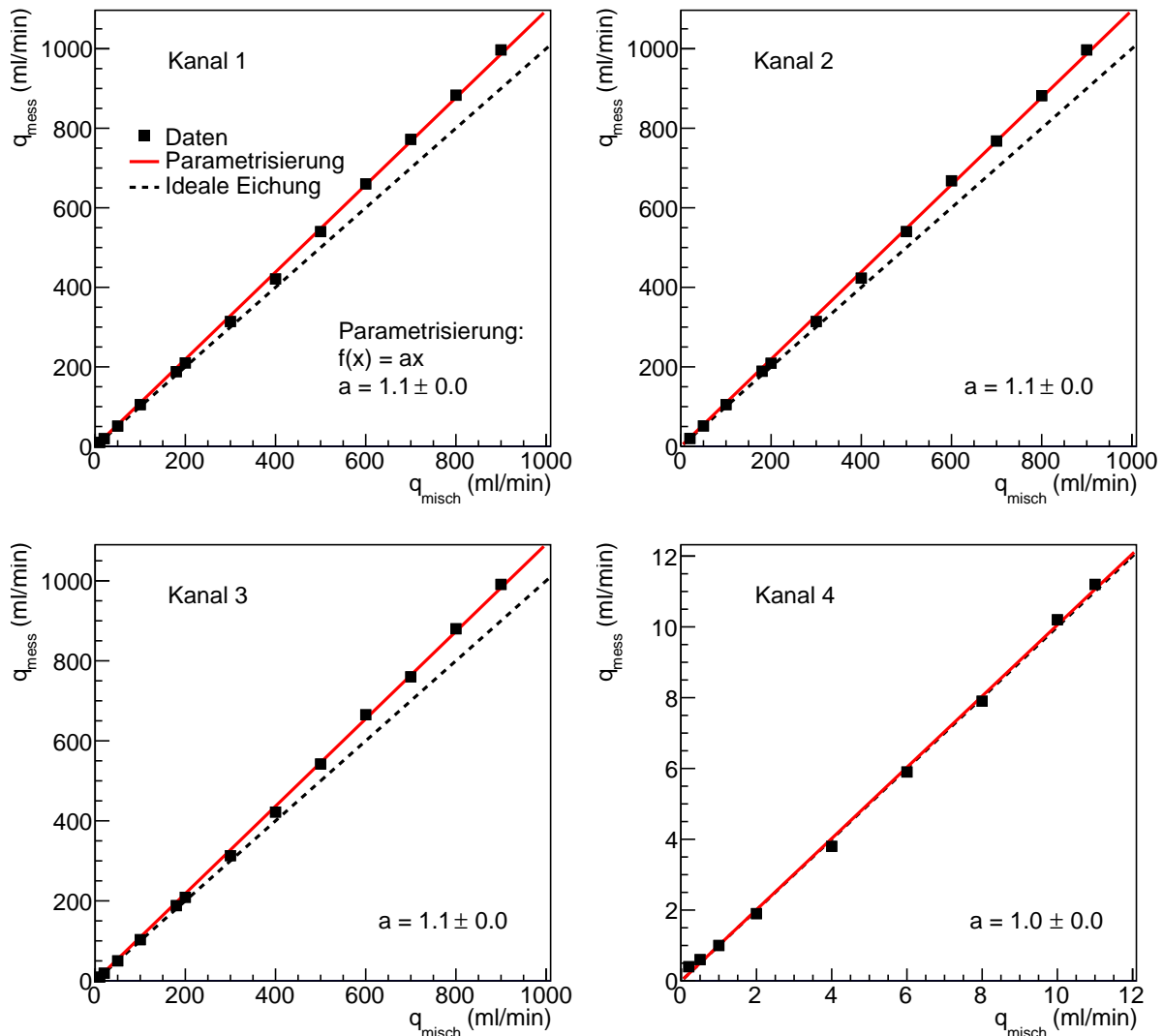


Abbildung 4.2: Überprüfung der Eichung der vier Flussregler. Gezeigt ist der mit dem Flussmesser von Agilent gemessene Gasfluss q_{mess} in Abhängigkeit von der Einstellung am *Multi Gas Controller* q_{misch} .

einer relativen Eichung nimmt die Steigung in Abbildung 4.2 einen von eins abweichenden, aber für alle Kanäle gleichen Wert an. Hängt der gemessene Fluss nur teilweise oder auch vollständig nicht-linear vom eingestellten Gasfluss ab, muss der jeweilige Flussregler neu kalibriert werden, da in den nicht-linearen Bereichen das Mischungsverhältnis nicht mehr über den *Multi Gas Controller* festgelegt werden kann.

Die Ergebnisse der Messungen für alle vier Kanäle des Gasmischers sind in Abbildung 4.2 zu sehen. Es besteht auf den ersten Blick ein linearer Zusammenhang zwischen dem gemessenen Wert q_{mess} und dem Wert am *Multi Gas Controller* q_{misch} , der durch eine Parametrisierung $f(x) = ax$ beschrieben werden kann. Die Steigung a weicht bei den Kanälen eins bis drei mit den Flussreglern mit einem Messbereich bis 1 l/min vom Idealfall ab. Der leicht erhöhte Wert bedeutet, dass der absolute Gasfluss größer ist als nach der

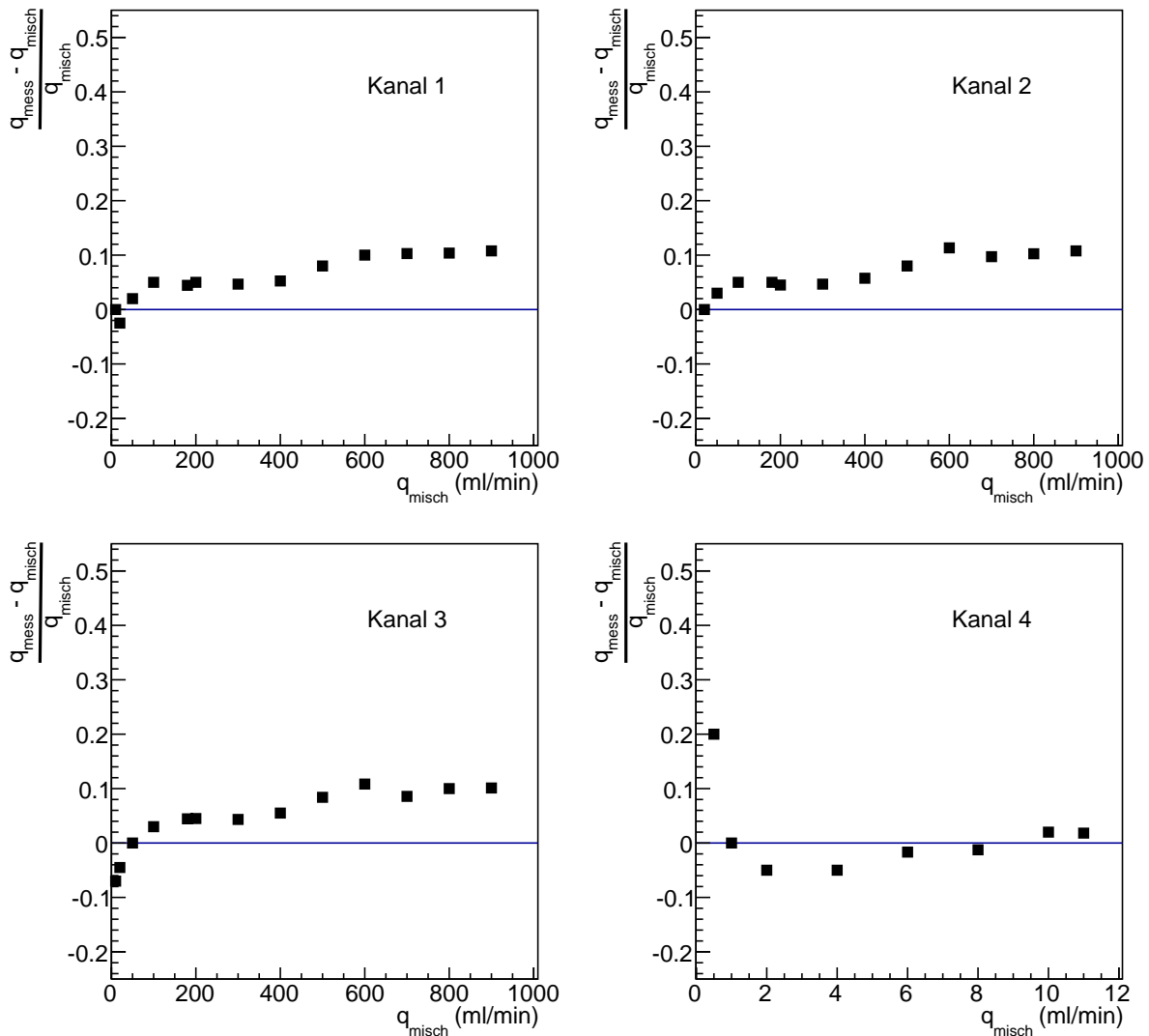


Abbildung 4.3: Relative Abweichung des gemessenen Gasflusses von der idealen Eichung aus Abbildung 4.2 für die vier verwendeten Flussregler.

Einstellung erwartet. Da aber die Steigung für die verschiedenen Kanäle gleich ist, hat dies keinen Einfluss auf das Mischungsverhältnis. Bei Kanal vier ist keine Abweichung sichtbar.

Abbildung 4.3 zeigt die relative Abweichung des gemessenen Gasflusses von der idealen Eichung aus Abbildung 4.2. Im jeweils linken Teil der vier Graphen, also bei kleinem Fluss, sind leichte Abweichungen von der Geraden zu sehen. Die Ergebnisse der Messungen zu den drei Flussreglern mit hohem Messbereich (bis 1 l/min) in den Kanälen eins bis drei zeigen jeweils einen ähnlichen Verlauf, unterscheiden sich aber vom Flussregler in Kanal vier (Messbereich bis 10 ml/min). Nach zunehmender Abweichung bei kleinem Fluss bilden sich zwei Plateaus zwischen $100 < q_{\text{misch}} < 400$ ml/min und $600 < q_{\text{misch}} < 900$ ml/min heraus. Eine Gasmischung, bei der die beteiligten Flussregler nicht im gleichen Plateau betrieben werden, würde, da die Abweichung vom idealen Wert unterschiedlich groß ist,

vom gewünschten Mischungsverhältnis abweichen. Der für kleinen Gasfluss ausgelegte Flussregler in Kanal vier zeigt bei einem Fluss $q_{\text{misch}} < 1$ ml/min die größte Abweichung, stabilisiert sich aber bei höherem Gasfluss, sodass die Abweichung ab $q_{\text{misch}} > 6$ ml/min vernachlässigbar ist.

Die für die weiteren Untersuchungen benötigten Gasmischungen $Ar-CO_2$ (90-10), $Ne-CO_2$ (90-10) und $Ne-CO_2-N_2$ (90-10-5) können mit den oben beschriebenen Flussreglern nur sehr inkonsistent hergestellt werden, da das Verhältnis 90 zu 10 bedeutet, dass die Flussregler in verschiedenen Bereichen betrieben werden und so das Mischungsverhältnis stark vom absoluten Gasfluss abhängt. Es gibt keine Kombination der Kanäle (mögliche Kombinationen: nur Kanäle mit großem Messbereich oder einer der Kanäle mit dem Kanal mit kleinem Messbereich), bei der die Flussregler in einem stabilen Bereich, also nicht in einem Randbereich, genutzt werden können. Um sowohl Gasmischungen als auch Gasfluss trotzdem flexibel wechseln zu können, wurde schließlich ein alternativer Flussregler mit einem mittleren Messbereich bis $100 \text{ cm}^3/\text{min}$ eingesetzt. In Kombination mit den vorhandenen Flussreglern lassen sich alle Gasmischungen mit der benötigten Genauigkeit so herstellen, dass auch eine Änderung des Gasflusses keine Auswirkung auf das Mischungsverhältnis hat.

4.3 Qualitative Stabilitätstests

Bevor in Kapitel 4.4 auf quantitative Stabilitätstests eingegangen wird, sollen nun einige Ergebnisse von qualitativen Messungen¹ zum besseren Verständnis des Versuchsaufbaus und zur Vorbereitung auf die späteren Messungen diskutiert werden. Es wird im weiteren Verlauf der Arbeit nicht näher auf die Herstellung der verwendeten Gasmischungen eingegangen, sondern davon ausgegangen, dass sie mit der benötigten Genauigkeit (vgl. Kapitel 4.2) vorliegen. Alle Messungen wurden an dem in Kapitel 3.4 beschriebenen Testaufbau durchgeführt.

4.3.1 Quellenposition

Die Position der verwendeten Strahlungsquellen in Bezug zum Driftvolumen der Testkammer hat Einfluss auf verschiedene Aspekte der Messung. Da die beim Zerfall entstehenden Teilchen eine bestimmte Reichweite im Detektorgas haben und die Quelle nicht direkt am Driftvolumen angebracht ist, werden einige der Teilchen schon vor dem Eindringen ins sensitive Volumen der TPC gestoppt und können so keine Signale in der Kammer erzeugen. Befindet sich die Quelle zu weit vom Driftvolumen entfernt, kommen keine Zerfallsteilchen in der Kammer an und es ist keine Messung der Energien der Teilchen möglich. Je näher die Quelle an die Kammer herangeführt wird, desto größer wird die Rate der

¹Streng genommen handelt es sich hierbei auch um quantitative Messungen, die Bezeichnung qualitativ soll hier darauf hinweisen, dass die Messwerte nicht mithilfe eines Amplitudenspektrums und in Abhängigkeit des *Gain* betrachtet werden.

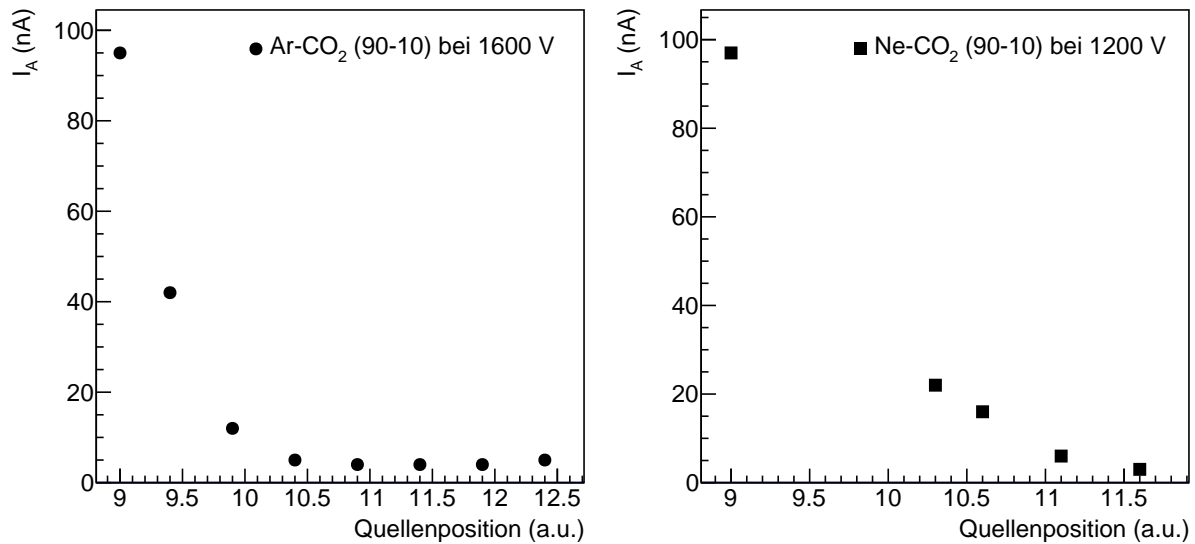


Abbildung 4.4: Einfluss der Quellenposition auf den Anodenstrom I_A für die Gasmischungen $Ar-CO_2$ (90-10) und $Ne-CO_2$ (90-10) bei jeweils konstanter Anodenspannung.

erzeugten Signale. Um Messungen in einem angemessenen zeitlichen Rahmen von einigen Stunden durchführen zu können, darf die Rate nicht zu klein sein. Allerdings gibt es auch eine obere Grenze für die Signalarate, die durch die verarbeitende Elektronik vorgegeben wird. Bei zu hoher Rate kommt es zur Überlagerung aufeinander folgender Ereignisse und die Amplitudenmessung wird unbrauchbar. Um den Abstand der Quelle zur Kammer zu optimieren, ist es deshalb wichtig, den Einfluss der Quellenposition auf die Messrate zu ermitteln.

Für die folgenden Messungen wurde die in Kapitel 3.4.3 aufgeführte Americium-Quelle verwendet und ihr Abstand zur Kammer mithilfe der Quellenhalterung variiert. Dabei wurde für die Gasmischungen $Ar-CO_2$ (90-10) und $Ne-CO_2$ (90-10) der Anodenstrom in Abhängigkeit von der angelegten Anodenspannung für verschiedene Quellenpositionen gemessen. Dieser hängt von der Signalarate ab, sodass ein höherer Strom auch eine höhere Rate impliziert.

Abbildung 4.4 zeigt bei jeweils fester Anodenspannung den Anodenstrom I_A als Funktion der Position der Quelle für die beiden Gasmischungen, wobei die Quellenposition Nummer neun der mechanisch kürzest möglichen Entfernung (beschränkt durch die Quellenhalterung und das Gehäuse der Quelle) zur Kammer entspricht. Da α -Teilchen in Neon eine größere Reichweite als in Argon haben, erwartet man für die Gasmischung $Ne-CO_2$ einen Abfall auf den minimalen Wert für den Anodenstrom schon bei kleineren Werten für die Quellenposition als bei der Gasmischung $Ar-CO_2$. Bei der Gasmischung $Ar-CO_2$ ist mit zunehmender Entfernung der Quelle von der Kammer ein deutlicher Abfall des Anodenstroms zu sehen, bis bei Quellenposition $\sim 10,5$ der minimale Wert (Nullstrom) erreicht wird. Dies könnte dadurch erklärt werden, dass alle α -Teilchen ihre Energie schon

Tabelle 4.2: Spannungswerte für erste Instabilitäten bei den Gasmischungen $Ar-CO_2$ (90-10), $Ne-CO_2$ (90-10) und $Ne-CO_2-N_2$ (90-10-5).

Gasmischung	$Ar-CO_2$ (90-10)	$Ne-CO_2$ (90-10)	$Ne-CO_2-N_2$ (90-10-5)
Spannung	1670 V	1350 V	1500 V

vor dem Eindringen in die Kammer abgegeben haben und somit keine Primärelektronen erzeugt werden.

Die Messwerte für die Gasmischung $Ne-CO_2$ (90-10) zeigen einen ähnlichen Verlauf wie für die Gasmischung $Ar-CO_2$. Allerdings erreicht der Anodenstrom erst bei einer größeren Quellenposition von $\sim 11,6$ einen Wert, der dem Nullstrom der Messung bei der Mischung $Ar-CO_2$ entspricht. Ein Vergleich der Quellenposition, an der für die jeweilige Gasmischung erstmals der Nullstrom auftritt, deutet darauf hin, dass die α -Teilchen bei der Gasmischung $Ne-CO_2$ schon bei einem größeren Abstand in die Kammer gelangen. Dies entspricht der aufgrund der unterschiedlichen Reichweiten ausgesprochenen Vermutung.

Die Messungen bestätigen, dass der Anodenstrom bei beiden Gasmischungen von der Position der Quelle abhängt. Da ein geringerer Abstand als bei Quellenposition 9,0 nicht realisierbar ist und bei dieser Einstellung noch keine negativen Effekte einer zu hohen Rate zu sehen sind, wird diese Quellenposition auch für die folgenden quantitativen Stabilitätstests verwendet. Der Vergleich einiger Messwerte für die Gasmischung $Ne-CO_2-N_2$ (90-10-5) mit den beiden näher untersuchten zeigt, dass die gezogenen Schlussfolgerungen auch auf diese Gasmischung ausgeweitet werden können.

Bei der Eisen-Quelle hat die Position des radioaktiven Strahlers keinen Einfluss auf die gemessenen Werte. Da γ -Strahlung eine viel größere Reichweite als α -Strahlung hat und der Abstand zur Drahtebene durch die vorgegebenen Bauteile beschränkt ist, kommt es nur zu geringen Variationen der Signalrate, die vernachlässigt werden können.

4.3.2 Erste Stabilitätsmessungen

Um den Versuchsaufbau am IKF letztlich für systematische quantitative Stabilitätstests nutzen zu können, muss zunächst gezeigt werden, dass sich die Anodenspannung und somit auch der *Gain* so weit steigern lässt, dass die Kammer instabil wird. Dazu wird die Spannung bei verschiedenen Gasmischungen hochgefahren und überprüft, ob es zu den in Kapitel 3.3.3 beschriebenen Spannungs-*Trips* kommt.

Tabelle 4.2 fasst die Ergebnisse der Messungen zusammen. Es kommt bei allen drei Gasmischungen zu von der Gasverstärkung an der Anode induzierten Spannungs-*Trips*. Diese treten bei den Gasmischungen mit Neon schon bei geringeren Spannungen auf, da der Townsend-Koeffizient für Neon bei gleichem elektrischen Feld höher ist als für Argon. Die Beimischung von Stickstoff verringert den Townsend-Koeffizienten, weshalb die Kammer dann erst bei höheren Spannungen instabil wird.

Tabelle 4.3: Gemessene Primärströme I_p bei α -Quelle (Americium) und γ -Quelle (Eisen) für die Gasmischungen $Ar-CO_2$ (90-10), $Ne-CO_2$ (90-10) und $Ne-CO_2-N_2$ (90-10-5).

Gasmischung	$Ar-CO_2$ (90-10)	$Ne-CO_2$ (90-10)	$Ne-CO_2-N_2$ (90-10-5)
α -Quelle	9,2 pA	49,9 pA	44,2 pA
γ -Quelle	2,9 pA	2,0 pA	2,5 pA

4.4 Quantitative Stabilitätstests

Im folgenden Kapitel sollen quantitative Stabilitätstests bei Variation der Gasverstärkung an der Anode bei den verschiedenen Gasmischungen mit der Americium- und der Eisen-Quelle diskutiert werden. Um aus Messungen des Anodenstroms den *Gain* bestimmen zu können, muss der von Strahler und Gas abhängige Primärstrom bekannt sein. Als Primärstrom bezeichnet man den von der radioaktiven Strahlung der Quelle ohne Gasverstärkung erzeugten Strom, der durch Addition der Ströme auf allen Drahtebenen bei abgeschalteter Anodenspannung gemessen werden kann. Die Ergebnisse der zur Bestimmung nötigen Primärstrommessungen werden nachfolgend präsentiert.

4.4.1 Primärstrommessungen

Der Primärstrom ändert sich je nach verwendetem Strahler und Gas. Die verschiedenen Strahlungsarten unterscheiden sich in der Art des Energieverlusts und der Zerfallsenergie der Teilchen, sodass die deponierte Energiemenge im sensitiven Volumen variiert. Da zur Ionisation der Gasteilchen aber für ein bestimmtes Gas immer die gleiche Ionisierungsenergie benötigt wird, entstehen je nach Quelle auch unterschiedlich viele primäre Elektronen. Verschiedene Gase haben unterschiedliche Ionisierungsenergien, weshalb die Anzahl der primären Elektronen nicht nur von der Strahlungsquelle, sondern auch von der verwendeten Gasmischung abhängt. Die Zahl der primären Elektronen pro Zeiteinheit bestimmt den Primärstrom, der deshalb auch für jede Strahlungsart und Gasmischung einzeln bestimmt werden muss.

Die Messungen zur Bestimmung des Primärstroms wurden mit dem in Kapitel 3.4.4 beschriebenen Pico-Amperemeter durchgeführt. Die Ergebnisse der Messung sind in Tabelle 4.3 dargestellt. Die Werte für den Primärstrom sind bei den Messungen mit der Americium-Quelle um einen Faktor drei bei der Gasmischung $Ar-CO_2$, bei den Neomischungen sogar um einen Faktor von ungefähr 20 größer als bei den Messungen mit der Eisen-Quelle. Dies kann durch die um etwa eine Größenordnung höhere Zerfallsenergie der α -Teilchen (vgl. Kapitel 3.4.3) erklärt werden. Die Abweichung der Werte zwischen den verschiedenen Gasmischungen kommt durch die unterschiedlichen Ionisierungsenergien zustande.

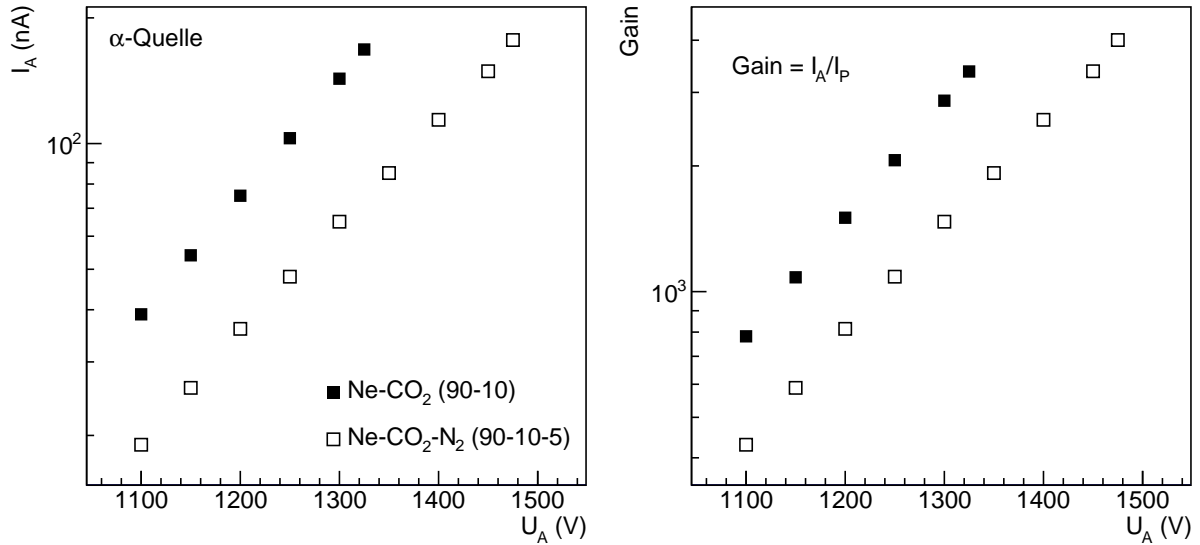


Abbildung 4.5: Ergebnisse der Stabilitätstests mit der α -Quelle: Anodenstrom I_A in Abhängigkeit von der Anodenspannung U_A für die Gasmischungen $Ne-CO_2$ (90-10) und $Ne-CO_2-N_2$ (90-10-5). Die für das jeweilige Gas maximale aufgetragene Spannung ist die letzte noch stabile Einstellung vor einem Spannungstrip.

4.4.2 Stabilitätstests mit der α -Quelle

Wie in Kapitel 3.3.3 erläutert, spielt die Wahl der Gasmischung für die elektrische Stabilität der Auslesekammer eine große Rolle. Hinweise dazu, welche die optimale Gasmischung für die experimentellen Bedingungen (Energiedichte, Kollisionsrate, Spurdichte in der TPC,...) bei ALICE ist, sollen die folgenden Ergebnisse der Stabilitätstests mit der α -Quelle bei den Gasmischungen $Ar-CO_2$ (90-10), $Ne-CO_2$ (90-10) und $Ne-CO_2-N_2$ (90-10-5) geben.

Da die Signale auf den Auslesepads der ALICE-TPC durch die Spuren von geladenen Teilchen im Driftvolumen erzeugt werden, wurden die Stabilitätsmessungen nicht nur mit der γ -Quelle (siehe Kapitel 4.4.3), sondern auch mit der α -Quelle durchgeführt. Da es beim Zerfall von Am-241 mehr Übergänge als beim Zerfall von Fe-55 gibt und die Energieverteilung der Zerfallsteilchen außerdem deutlich breiter ist, können für die Auswertung der Messungen keine Amplitudenspektren genutzt werden. Die Bestimmung des *Gains* über die Normierung des gemessenen Anodenstroms auf die jeweiligen Primärströme alleine bietet aber schon die Möglichkeit zum Vergleich der verschiedenen Gasmischungen in Bezug auf die elektrische Stabilität. Um eine gute Auflösung zu erreichen, muss die Auslesekammer auch bei hohem *Gain* noch gute Stabilitätseigenschaften besitzen.

Abbildung 4.5 zeigt den Anodenstrom I_A in Abhängigkeit von der Anodenspannung U_A für die beiden Neon-Gasmischungen (links). Teilt man den Anodenstrom durch den Primärstrom I_p (vgl. Kapitel 4.4.1) im verwendeten Gas, ergibt sich der *Gain* (rechts). Die maximale aufgetragene Anodenspannung für jede Gasmischung, also das Ende der Ver-

teilung der Datenpunkte, entspricht der letzten noch stabilen Einstellung vor einem *Trip*. Der erwartete exponentielle Anstieg des Anodenstroms mit steigender Anodenspannung ist in der logarithmischen Darstellung gut als linearer Verlauf zu erkennen.

Die spannungsabhängige Verteilung der Datenpunkte für den *Gain* im rechten Teil von Abbildung 4.5 zeigt die gleiche Abhängigkeit von U_A wie die Verteilung der Datenpunkte für den Anodenstrom links, da sich der *Gain* durch Division durch den konstanten Primärstrom I_p berechnet und sich somit die Datenpunkte nur um einen bestimmten Faktor verschieben. Der Primärstrom hängt aber von der Gasmischung ab (siehe Tabelle 4.3), sodass sich die Lage der Datenpunkte relativ zueinander ändert. Bei den Neon-Mischungen treten Spannungs-*Trips* bei einem *Gain* von ungefähr 4000 auf, wobei die Beimischung von Stickstoff zu um ungefähr 25% stabileren Bedingungen führt.

4.4.3 Stabilitätstests mit der γ -Quelle

Im Gegensatz zu den Messungen mit der α -Quelle, bei denen die Verteilung im Amplitudenspektrum zu breit ist, um einen Peak zu bestimmen, kann bei den Messungen mit der γ -Quelle ein eindeutiger Peak identifiziert werden. Aufgrund der nahezu perfekten gaußförmigen Struktur lässt sich die Position des Peaks im Amplitudenspektrum mit einem Gaußfit sehr genau ermitteln. Da die Amplitudenhöhen direkt proportional zum *Gain* sind, zeigen diese beiden Größen die gleiche funktionelle Abhängigkeit von der angelegten Anodenspannung. Allerdings ist die entstehende Verteilung der Datenpunkte in Bezug auf die elektrische Stabilität noch nicht vergleichbar, da dafür der *Gain* in Abhängigkeit von der Anodenspannung betrachtet werden muss. Die Messung der Amplitudenhöhen bietet jedoch trotzdem eine sehr gute Möglichkeit, die für die Bestimmung des *Gain* nötigen Strommessungen zu verifizieren.

Abbildung 4.6 zeigt die mit dem ADC gemessene Amplitudenhöhe in Abhängigkeit von der Anodenspannung U_A für die drei verwendeten Gasmischungen $Ne-CO_2$ (90-10), $Ne-CO_2-N_2$ (90-10-5) und $Ar-CO_2$ (90-10) mit der Eisen-Quelle als Strahler. Die höchste aufgetragene Spannung entspricht der letzten noch stabilen Einstellung vor einem *Trip*. Die als gefüllte Kreise gezeigte Verteilung für die Argon-Mischung zeigt einen exponentiellen Verlauf, der bei logarithmischer Skala linear ist, wohingegen die als gefüllte und offene Quadrate zu sehenden Verteilungen für die Neon-Mischungen eine Abweichung zu höheren Werten bei größeren Spannungen zeigen. Der lineare Verlauf der Datenpunkte spiegelt, wie schon bei den Messungen mit der α -Quelle, den exponentiellen Anstieg der Verstärkung der Elektronen mit steigender Anodenspannung wider. Die Abweichung der Datenpunkte zu höheren Werten vom linearen Verlauf bei $Ne-CO_2$ und $Ne-CO_2-N_2$ kann durch den ansteigenden Townsend-Koeffizienten erklärt werden.

Um die elektrische Stabilität für die verschiedenen Gasmischungen in Abhängigkeit vom *Gain* zu bestimmen, muss wieder eine Messung des Anodenstroms I_A herangezogen werden. Abbildung 4.7 zeigt im linken Teil die Messwerte der Strommessungen für die

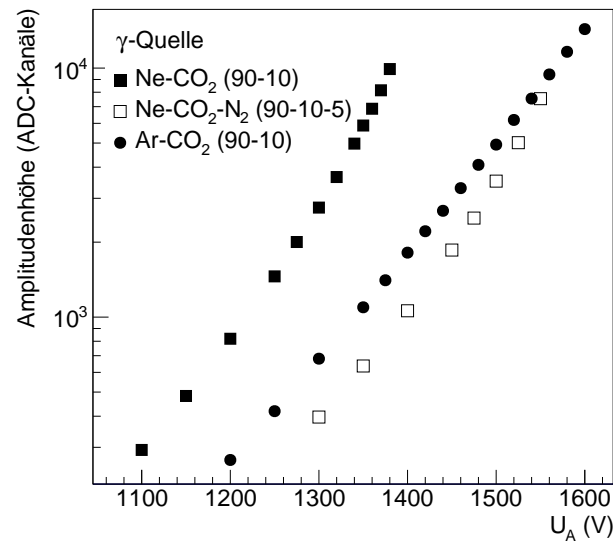


Abbildung 4.6: Amplitudenhöhen in Abhängigkeit von der Anodenspannung U_A bei den Gasmischungen $Ne-CO_2$ (90-10), $Ne-CO_2-N_2$ (90-10-5) und $Ar-CO_2$ (90-10). Die für das jeweilige Gas maximale aufgetragene Spannung ist die letzte noch stabile Einstellung vor einem Spannungs-*Trip*.

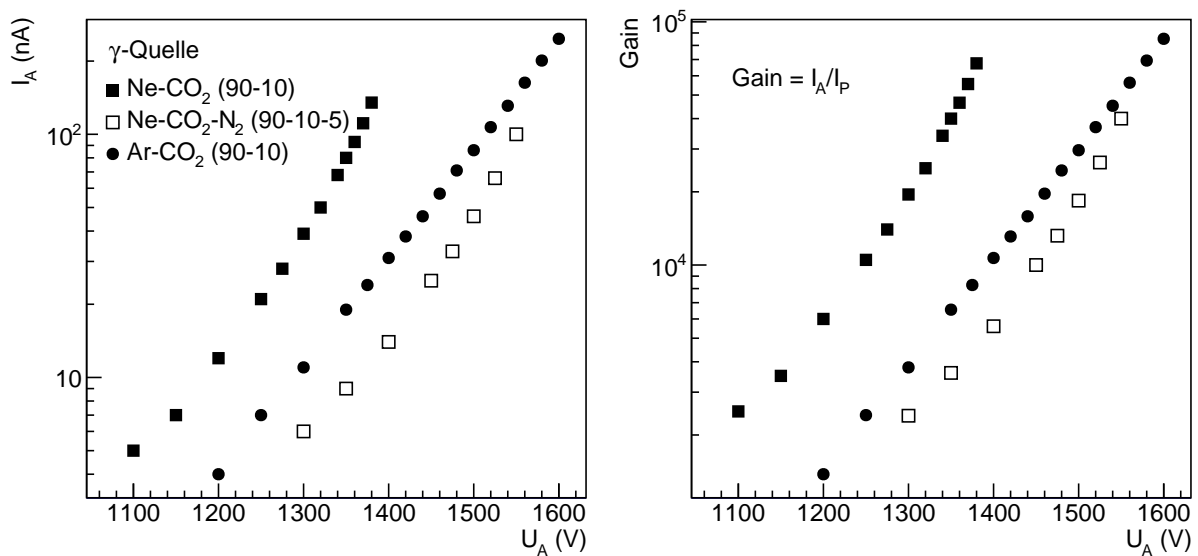


Abbildung 4.7: Ergebnisse der Stabilitätstests mit der γ -Quelle: Anodenstrom I_A in Abhängigkeit von der Anodenspannung U_A und den Gasmischungen $Ne-CO_2$ (90-10), $Ne-CO_2-N_2$ (90-10-5) und $Ar-CO_2$ (90-10). Die für das jeweilige Gas maximale aufgetragene Spannung ist die letzte noch stabile Einstellung vor einem Spannungs-*Trip*.

Gasmischungen $Ne-CO_2$ (90-10), $Ne-CO_2-N_2$ (90-10-5) und $Ar-CO_2$ (90-10) in Abhängigkeit von der Anodenspannung. Der Verlauf dieser Verteilung stimmt, wie zu erwarten, gut mit dem Verlauf der Verteilung in Abbildung 4.6 überein.

Um die elektrische Stabilität in Bezug auf den *Gain* bei den verschiedenen Gasmischungen vergleichen zu können, müssen die Werte der Anodenstrommessungen durch die jeweiligen Primärströme für die γ -Quelle aus Tabelle 4.3 geteilt werden. Der rechte Teil von Abbildung 4.7 zeigt die daraus entstehende Verteilung des *Gains*. Der jeweils letzte Datenpunkt einer Messreihe entspricht wieder der letzten stabilen Einstellung vor einem Spannungs-*Trip*. Ein Vergleich dieser Datenpunkte zeigt, dass die Verwendung von $Ar-CO_2$ (90-10) zu den stabilsten Bedingungen führt. Spannungs-*Trips* treten hier erst bei einem *Gain* von ungefähr 100000, dem höchsten Wert für die drei Gasmischungen, auf. Im Vergleich der beiden Neon-Mischungen ist für die Beimischung von Stickstoff zu $Ne-CO_2$ keine Verbesserung der Stabilität zu erkennen. Während bei $Ne-CO_2$ die Auslesekammer bis zu einem *Gain* von 7×10^4 stabil betrieben werden kann, zeigt sie bei $Ne-CO_2-N_2$ schon bei einem *Gain* von 4×10^4 elektrische Instabilitäten. Das bedeutet, dass die Gasmischung $Ne-CO_2$ (90-10) für stabilere Bedingungen sorgt als die Gasmischung $Ne-CO_2-N_2$ (90-10-5).

4.4.4 Stabilitätstests mit der γ -Quelle bei umgebauter Kammer

Da die in Kapitel 4.4.3 beschriebene Messung im Widerspruch zu früheren Messreihen (siehe [Gar04]) steht und mögliche Inkonsistenzen im Versuchsaufbau ausgeschlossen werden sollen, wurden die Drahtebenen (Kathode und Anode) nach den Messungen ausgetauscht und die Padebene poliert. Die dauerhafte Bestrahlung der selben Drahtebenen kann zu Ablagerungen auf den Drähten und somit zu Abweichungen in der elektrischen Stabilität führen, die nicht auf die unterschiedliche Gasmischung zurückzuführen sind. Den gleichen Effekt können auch Ablagerungen auf der Padebene verursachen, weshalb dessen Oberfläche auch neu poliert wurde.

Ein Umbau der Auslesekammer birgt immer die Gefahr, neue Schwachstellen, zum Beispiel offene Kabel an Lötstellen, für einen Funkenüberschlag zu erzeugen, die die elektrische Stabilität der Kammer beeinflussen. Ein Hochspannungstest der umgebauten Kammer soll sicherstellen, dass mögliche *Trips* der Auslesekammer ihren Ursprung weiterhin in einem zu hohen *Gain* haben und nicht durch eine mangelnde Isolation der neuen Drahtebenen ausgelöst werden. Dazu wird die radioaktive Quelle aus der Kammer entfernt, sodass keine Signale mehr durch Ionisationen im Driftvolumen erzeugt werden, und die Anodenspannung erhöht, bis es zu einem *Trip* kommt. Der Hochspannungstest an der Auslesekammer mit den ausgetauschten Drahtebenen zeigte, dass die Kammer ohne Bestrahlung durch eine radioaktive Quelle bis zu Spannungen von über 1650 V elektrisch stabil ist.

Um einen möglichen Einfluss von Ablagerungen auf den Drähten der Auslesekammer auf

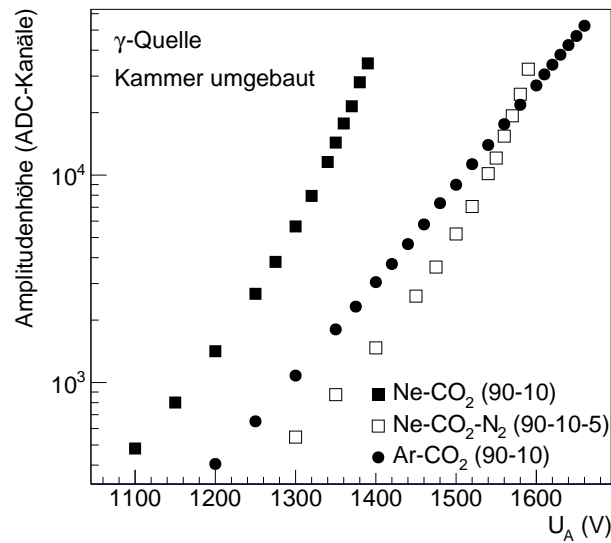


Abbildung 4.8: Ergebnisse der Stabilitätstests mit der γ -Quelle mit ausgetauschten Drahtebenen: Anodenstrom I_A in Abhängigkeit von der Anodenspannung U_A und den Gasmischungen $Ne-CO_2$ (90-10), $Ne-CO_2-N_2$ (90-10-5) und $Ar-CO_2$ (90-10). Die für das jeweilige Gas maximale aufgetragene Spannung ist die letzte noch stabile Einstellung vor einem Spannungs-*Trip*.

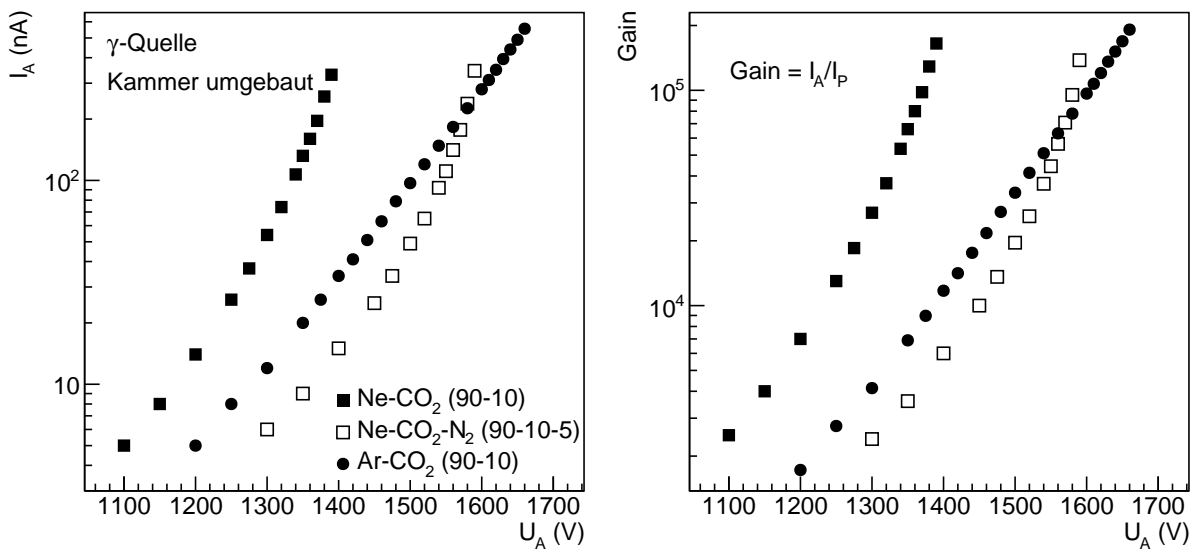


Abbildung 4.9: Ergebnisse der Stabilitätstests mit der γ -Quelle mit ausgetauschten Drahtebenen: Anodenstrom I_A in Abhängigkeit von der Anodenspannung U_A und den Gasmischungen $Ne-CO_2$ (90-10), $Ne-CO_2-N_2$ (90-10-5) und $Ar-CO_2$ (90-10). Die für das jeweilige Gas maximale aufgetragene Spannung ist die letzte noch stabile Einstellung vor einem Spannungs-*Trip*.

die Stabilitätseigenschaften auszuschließen, werden die Messungen mit der γ -Quelle wiederholt. Abbildung 4.8 zeigt die Ergebnisse der Amplitudenmessung in Abhängigkeit von der Anodenspannung bei den drei Gasmischungen $Ne-CO_2$ (90-10), $Ne-CO_2-N_2$ (90-10-5) und $Ar-CO_2$ (90-10) mit der umgebauten Auslesekommer. Ein Vergleich der jeweils letzten Datenpunkte einer Messreihe zur in Abbildung 4.6 zu sehenden Messung vor dem Umbau zeigt, dass die Kammer bei allen drei Gasmischungen stabiler ist, der prinzipielle Verlauf der Verteilung der Datenpunkte hat sich allerdings nicht geändert. Der *Trip*-Punkt von $Ne-CO_2-N_2$ liegt etwas näher an dem von $Ne-CO_2$ als vor dem Umbau.

Der linke Teil von Abbildung 4.9 zeigt den Anodenstrom I_A in Abhängigkeit von der Anodenspannung U_A bei umgebauter Kammer für die drei Gasmischungen. Der Verlauf der Datenpunkte stimmt mit dem in Abbildung 4.8 gezeigten Verlauf überein. Grobe Messfehler bei der Strommessung können so ausgeschlossen werden. Um auch hier aus den Anodenströmen den *Gain* zu bestimmen, müssen die gemessenen Werte wiederum durch die von der γ -Quelle induzierten Primärströme aus Tabelle 4.3 geteilt werden. Der rechte Teil von Abbildung 4.9 zeigt die Abhängigkeit des *Gain* von der Anodenspannung für die drei Gasmischungen. Die Messwerte für $Ar-CO_2$ zeigen wie schon vor dem Umbau der Kammer einen linearen Verlauf. Die Auslesekommer ist bis zu einem *Gain* von 2×10^5 stabil. Auch bei den Neon-Mischungen zeigt die Kammer eine erhöhte elektrische Stabilität im Vergleich zur Messung mit den alten Drahtebenen. In Bezug auf den *Gain* liegen die *Trip*-Punkte zwar näher zusammen, allerdings ist die Auslesekommer weiterhin bei $Ne-CO_2$ stabiler als bei $Ne-CO_2-N_2$.

5 Zusammenfassung

In der vorliegenden Arbeit werden Stabilitätstests an einer Vieldrahtproportionalkammer nach ALICE-Geometrie vorgestellt. Wegen elektrischer Instabilitäten, das heißt dem Abschalten der Hochspannungsversorgung einzelner Kammern aufgrund von Entladungen an der Ausleseebene, wurde die ALICE-TPC bisher mit zwei unterschiedlichen Gasmischungen betrieben. Es wurden die Gasmischungen $Ne-CO_2$ (90-10) und $Ne-CO_2-N_2$ (90-10-5) verwendet.

In dieser Arbeit soll nun mit systematischen Stabilitätstests mit einer α - und einer γ -Quelle am Testaufbau am IKF untersucht werden, ob eine Beimischung von Stickstoff zur Gasmischung $Ne-CO_2$ wirklich positive Auswirkungen auf die elektrische Stabilität der Vieldrahtproportionalkammern der ALICE-TPC hat. Messungen mit der Gasmischung $Ar-CO_2$ (90-10) dienen dabei als Referenzmessungen.

Zunächst wurden vorbereitende Messungen zum besseren Verständnis des Einflusses der Ausleseelektronik auf die Padsignale am Testaufbau durchgeführt. Die Untersuchung der von einem Pulser induzierten Signale zeigt, dass keine Korrektur der Nullverschiebung nötig ist. Außerdem konnten durch diese Messung die Verstärkungsfaktoren des verwendeten Hauptverstärkers ermittelt werden. Ein weiterer wichtiger Faktor für Stabilitätstests ist die Genauigkeit des Mischungsverhältnisses des Gases. Um eine hohe Genauigkeit zu gewährleisten, wurde der Gasfluss der verschiedenen Kanäle des zur Herstellung der Gasmischung genutzten Gasmischers überprüft und so die Bereiche für den Gasfluss gefunden, in denen sich das Mischungsverhältnis nicht ändert.

Eine gute Auflösung kann mit Vieldrahtproportionalkammern erreicht werden, wenn die Kammern auch bei einem möglichst großen *Gain* noch stabil betrieben werden können. Um den *Gain* aus Anodestrommessungen bestimmen zu können, wurden die Primärströme für die α - und die γ -Quelle ermittelt.

Frühere Messungen mit einer γ -Quelle, aufgrund derer Stickstoff als Beimischung in den Fokus rückte, ließen vermuten, dass sich durch die Beimischung von Stickstoff die Stabilität der Auslekammern verbessern lassen würde. Die durchgeführten Messungen mit der γ -Quellen sollten diese Aussage nun überprüfen. Sie können die früheren Ergebnisse jedoch nicht bestätigen, sondern zeigen, dass die Gasmischung $Ne-CO_2-N_2$ (90-10-5) im Gegensatz zur Gasmischung $Ne-CO_2$ (90-10) bei Bestrahlung mit der γ -Quelle zu instabileren Bedingungen für die Auslekammer führt.

Zum Erzeugen der Anodensignale bei Stabilitätstests wurden erstmals geladene Teilchen aus einer α -Quelle verwendet. Im Gegensatz zur Messung mit der γ -Quelle kann

die Auslesekammer bei der Beimischung von Stickstoff zu $Ne-CO_2$ bis zu einem um 25% höheren *Gain* stabil betrieben werden als bei der Gasmischung $Ne-CO_2$.

Aufgrund des je nach verwendeter Quelle unterschiedlichen Effekts auf die Stabilität der Auslesekammer lässt sich nicht mit absoluter Sicherheit sagen, ob eine Beimischung von Stickstoff die gewünschten Auswirkungen hat. Allerdings werden die Spuren in der ALICE-TPC durch geladene Teilchen hervorgerufen, sodass die Messungen mit der α -Quelle den experimentellen Bedingungen bei ALICE näher kommen als die Messungen mit der γ -Quelle und deshalb die Gasmischung $Ne-CO_2-N_2$ (90-10-5) zu bevorzugen ist.

Quellenverzeichnis

- [Gri08] D. Griffiths, *Introduction to Elementary Particles*, 2. erweiterte Auflage, Wiley-VCH, Weinheim, 2008.
- [Per00] D. H. Perkins, *Introduction to High Energy Physics*, 4. Auflage, Cambridge University Press, Cambridge, 2000.
- [Pov06] B. Povh, K. Rith, C. Scholz, F. Zetsche, *Teilchen und Kerne*, 7. Auflage, Springer, Berlin, Heidelberg, 2006.
- [Stö05] H. Stöcker, *Taschenbuch der Physik*, 5. Auflage, Harri Deutsch, Frankfurt am Main, 2005.
- [Yag05] K. Yagi, T. Hatsudo, Y. Miake, *Quark-Gluon Plasma*, 1. Auflage, Cambridge University Press, Cambridge, 2005.
- [Bre09] A. Breskin, R. Voss, *The CERN Large Hadron Collider: Accelerator and Experiments, Volume 1*, The Scientific Information Service, CERN, 2009.
- [Nof10] F. Noferini, *Particle production in pp collisions at 900 GeV and 7 TeV with ALICE*, WISH2010, 2010.
- [Wie08] J. Wiechula, *Commissioning and Calibration of the ALICE-TPC*, Doktorarbeit, Goethe-Universität Frankfurt am Main, 2008.
- [ALI10] ALICE TPC Collaboration, *The ALICE TPC, a large 3-dimensional tracking device with fast readout for ultra-high multiplicity events*, Nucl. Instr. Meth. A 622, 316, 2010.
- [Vee03] R. Veenhof, *Choosing a gas mixture for the ALICE TPC*, ALICE-INT-2003-29, 2003.
- [Gar04] C. Garabatos, *The ALICE TPC*, Nucl. Instr. Meth. A 535, 197-210, 2004.
- [Sch14] A. Schell, *private Kommunikation*, 2014.
- [Ren13] R. Renfordt, *private Kommunikation*, 2013.
- [Bet08] K. Bethge, G. Walter, B. Wiedemann, *Kernphysik - Eine Einführung*, 3. aktualisierte und erweiterte Auflage, Springer, Berlin, Heidelberg, 2008.

- [NUB03] G. Audi, O. Bersillon, J. Blachot, A. H. Wapstra, *The NUBASE evaluation of nuclear and decay properties*, Nucl. Phys. A **729** 3-128, 2003.
- [Mus03] L. Musa et al., *The ALICE TPC Front End Electronics*, IEEE Nuclear Science Symposium Vol. 5, 3647-3651, 2003.
- [Ort10] Ortec Products Group, *Easy-MCA-2k/8k*, Datenblatt, 2010.
- [MKS12] MKS Instruments Deutschland GmbH, *Multi Channel Flow Ration/Pressure Controller Type 647C*, Benutzerhandbuch, 2012.
- [MKS04] MKS Instruments Deutschland GmbH, *Digitale Gasflussregler Typ 1179B/1479B/2179B und Digitaler Gasflussmonitor 179B*, Benutzerhandbuch, 2004.
- [Agi14] Agilent Technologies, *Flow meter ADM 2000*, Benutzerhandbuch, 2014.

Abkürzungsverzeichnis

ADC	<i>Analoge-to-digital Converter</i>
ALICE	<i>A Large Ion Collider Experiment</i>
ATLAS	<i>A Toroidal LHC ApparatuS</i>
CERN	<i>Conseil Européen pour la Recherche Nucléaire</i>
CMS	<i>Compact Muon Solenoid</i>
EMCal	<i>Elektromagnetic Calorimeter</i>
HMPID	<i>High Momentum Particle Identification Detector</i>
IKF	Institut für Kernphysik Frankfurt
IROC	<i>Inner Readout Chamber</i>
ITS	<i>Inner Tracking System</i>
LHCb	<i>Large Hadron Collider beauty</i>
LHC	<i>Large Hadron Collider</i>
MWPC	<i>Multi-Wire Proportional Chamber</i>
OROC	<i>Outer Readout Chamber</i>
PHOS	<i>Photon Spectrometer</i>
QCD	Quantenchromodynamik
QGP	Quark-Gluon-Plasma
TOF	<i>Time Of Flight</i>
TPC	<i>Time-Projection Chamber</i>
TRD	<i>Transition Radiation Detector</i>

Danksagung

Mein ganz besonderer Dank gilt Prof. Dr. Henner Büsching. Nicht nur dafür, dass er mir diese Arbeit ermöglicht hat und stets mit gutem Rat zur Stelle war, sondern auch für die große Hilfe und Unterstützung beim Verfassen dieser Arbeit.

Außerdem danke ich Prof. Dr. Harald Appelshäuser, der mit seinem fachlichen Wissen die Arbeit immer wieder vorangebracht hat.

Das Gleiche gilt für Dr. Rainer Renfordt, der meine tägliche Laborarbeit betreut und weitergebracht hat. Ihm habe ich für die Einführung in die experimentellen Arbeitsweisen und die zahlreichen anregenden Diskussionen zu danken. Er hatte für alle Fragen immer ein offenes Ohr.

Ein weiterer großer Dank gilt der gesamten Arbeitsgruppe des IKF, die mich beim Beginn der Arbeit sofort herzlich aufgenommen hat. Das gute Arbeitsklima trägt auch seinen Teil zum Gelingen dieser Arbeit bei.

Im Besonderen möchte ich mich hier bei meinen Bürokollegen Patrick Reichelt, Carsten Klein, Esther Bartsch, Mahmut Özdemir und Irem Erdemir bedanken, die mit fachlichen, sachlichen und teilweise auch unsachlichen Gesprächen für ein positives und produktives Klima und für Abwechslung von der Laborarbeit gesorgt haben. Der gleiche Dank gilt Theo Bröker, der zwar nicht auf dem Türschild steht, den ich aber doch schon halb zu meinen Bürokollegen zähle.

Weiterhin danke ich Philipp Lüttig, der jederzeit bereit war, einem Bachelor-Studenten mit einem Hardware-Thema die Geheimnisse des Plottens mit Root näher zu bringen. Ihm verdanke ich, neben einigen Stunden Lebenszeit, dass die im Labor erzielten Ergebnisse in so anschaulicher Form den Weg in diese Arbeit gefunden haben.

Ich bedanke mich bei Reinhold Ziegler für das Korrekturlesen dieser Arbeit.

Außerdem danke ich meinen Eltern, die mir das Studium überhaupt erst ermöglichen und mich in jeder Hinsicht unterstützen.

Zu guter Letzt gilt mein größter Dank Alice Ziegler, die lange Zeit während des Entstehens dieser Arbeit nicht viel von mir gesehen hat und doch immer für mich da war.

Eigenständigkeitserklärung

Hiermit erkläre ich, dass ich die Arbeit selbstständig und ohne Benutzung anderer als der angegebenen Quellen und Hilfsmittel verfasst habe. Alle Stellen der Arbeit, die wörtlich oder sinngemäß aus Veröffentlichungen oder aus anderen fremden Texten entnommen wurden, sind von mir als solche kenntlich gemacht worden. Ferner erkläre ich, dass die Arbeit nicht - auch nicht auszugsweise - für eine andere Prüfung verwendet wurde.

Frankfurt am Main, 10.03.2014

Fabian Pliquet

