

**Institut für Kernphysik**  
**Technische Universität Darmstadt**



Tarek Kreß

Ein universelles Monitorsystem zur  
Überwachung des Betriebszustands  
der Driftkammern des FOPI-Detektors

Diplomarbeit

1997



Ein universelles Monitorsystem zur  
Überwachung des Betriebszustands  
der Driftkammern des FOPI-Detektors

Diplomarbeit

Tarek Kreß



## **Zusammenfassung**

Ziel der vorliegenden Arbeit ist es, durch umfassende Messung der Parameter der Driftkammern des FOPI-Detektors Einblick in deren Betriebszustand zu erhalten. Damit kann die zur Identifizierung von seltenen Teilchen benötigte Auflösung verbessert und die Lebensdauer der Driftkammern erhöht werden. Nach der Vorstellung des FOPI-Detektors werden die zur Teilchenidentifizierung dienenden, in einer Driftkammer ablaufenden physikalischen Prozesse und die sie beeinflussenden Parameter beschrieben. Diese wurden im Rahmen der vorliegenden Arbeit am FOPI-Detektor während eines dreiwöchigen Experiments gemessen und aufgezeichnet. Die Kalibrierung und Installation der dazu verwendeten Sensoren wird beschrieben. Der zeitliche Verlauf der aufgezeichneten Größen und eine Abschätzung der sich daraus für die Driftkammern ergebenden Folgen werden gezeigt. Um die das Altern der Driftkammern beschleunigenden Entladungen besser verstehen zu können, wurden während des Experiments die Änderungen der Potentialströme der Sektoren der Driftkammern gemessen. Zur Überwachung der in den Driftkammern fließenden Ströme wurden elektrische Schaltungen entwickelt, die den Betrieb der Driftkammern sicherer gemacht haben.



# Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis	4
Tabellenverzeichnis	5
<b>1 Einleitung</b>	<b>7</b>
<b>2 Der FOPI-Detektor</b>	<b>11</b>
2.1 Aufbau des FOPI-Detektors . . . . .	11
2.1.1 Driftkammern . . . . .	12
2.1.2 Szintillatoren . . . . .	15
2.2 Teilchenidentifikation mit dem Detektor . . . . .	16
<b>3 Driftkammern</b>	<b>19</b>
3.1 Funktionsprinzip einer Driftkammer . . . . .	19
3.1.1 Ionisierung . . . . .	20
3.1.2 Elektronendrift und Driftgeschwindigkeit . . . . .	20
3.1.3 Gasverstärkung . . . . .	21
3.2 Driftkammern im Magnetfeld . . . . .	26
3.2.1 Impulsbestimmung mit dem Magnetfeld . . . . .	26
3.2.2 Auswirkung des Magnetfelds auf die Driftelektronen . . . . .	26
3.3 Unterscheidung von Spur und Spiegelspur . . . . .	27
<b>4 Probleme der Driftkammern</b>	<b>29</b>
<b>5 Das neue Gassystem</b>	<b>31</b>
5.1 Das FOPI-Gasgemisch . . . . .	31
5.1.1 Zusammensetzung des Gasgemischs . . . . .	31
5.1.2 Beimischung des Wassers . . . . .	32

5.2	Das neue Gassystem . . . . .	34
5.3	Erzeugung des Gasgemischs . . . . .	37
5.4	Verteilung des Gasgemischs . . . . .	44
5.5	Der Sauerstoffgehalt im Abgas . . . . .	47
<b>6</b>	<b>Temperatur, Druck und Magnetfeld</b>	<b>51</b>
6.1	Installation der Sensoren . . . . .	51
6.2	Temperatur . . . . .	53
6.3	Druck . . . . .	57
6.3.1	Messung des Absolutdrucks . . . . .	57
6.3.2	Messung des Differenzdrucks . . . . .	61
6.3.3	Untersuchung der Sensoren in einem Magnetfeld . . . . .	63
6.4	Magnetfeld . . . . .	64
<b>7</b>	<b>Die Hochspannungsversorgung der Driftkammern</b>	<b>67</b>
7.1	Alterungseffekte, Durchschläge und Dauerentladungen . . . . .	67
7.2	Beobachtung der Potentialströme der Sektoren . . . . .	69
7.2.1	Messung und Anzeige der Stromänderungen . . . . .	70
7.2.2	Stromänderungen der CDC . . . . .	71
7.2.3	Stromänderungen im Helitron . . . . .	74
<b>8</b>	<b>Verbesserung des Hochspannungssystem</b>	<b>75</b>
8.1	Konditionierung der Driftkammern . . . . .	75
8.2	Stromüberwachung für den Driftstrom . . . . .	75
8.3	Stromüberwachung für den Potentialstrom . . . . .	78
<b>9</b>	<b>Zusammenfassung und Ausblick</b>	<b>81</b>
<b>A</b>	<b>ADC und Computer</b>	<b>83</b>
A.1	ADC des Typs ISM110 . . . . .	83
A.1.1	Konfiguration der ISM . . . . .	87
A.2	Computer . . . . .	88
A.3	Software . . . . .	88
A.3.1	Die Programmiersprache LabVIEW . . . . .	88
A.3.2	Die Programmierung . . . . .	89
A.3.3	Das Programm . . . . .	89
A.4	Auswertung der Log-Datei . . . . .	90

# Abbildungsverzeichnis

2.1	Der FOPI-Detektor PHASE 2 . . . . .	13
2.2	Aufbau von CDC und Helitron . . . . .	14
2.3	Kernreaktion im FOPI-Detektor . . . . .	17
3.1	Elektronenlawine . . . . .	22
3.2	Potentialverhältnisse in einer Driftkammer . . . . .	24
3.3	Schema einer Driftkammer . . . . .	25
4.1	Drähte der CDC mit Ablagerungen . . . . .	30
5.1	Dampfdruckkurve von Wasser . . . . .	33
5.2	Das neue Gassystem . . . . .	35
5.3	Eichkurven der Mass-Flow-Controller . . . . .	39
5.4	Gasflüsse während des Experiments . . . . .	43
5.5	Gasverteilung auf die Driftkammern . . . . .	46
5.6	Sauerstoffgehalt von CDC bzw. Helitron . . . . .	48
6.1	Sensoren an den Driftkammern . . . . .	52
6.2	Der Temperaturverlauf am Detektor . . . . .	55
6.3	Absolutdruckverlauf . . . . .	59
6.4	Differenzdruck und Gasfluß . . . . .	62
6.5	Differenzdrucksensor im Magnetfeld . . . . .	63
6.6	Magnetfeld während des Experiments . . . . .	65
7.1	Hochspannungsverteiler der CDC . . . . .	70
7.2	Stromänderungen der CDC-Sektoren . . . . .	73
8.1	Schaltung zur Driftstromüberwachung . . . . .	77
8.2	Funktionsskizze der Stromüberwachung . . . . .	77

8.3	Potentialstrommessung am Netzgerät . . . . .	78
A.1	Das Computermeßsystem . . . . .	84

# Tabellenverzeichnis

3.1	Einflüsse auf Gasverstärkung und Driftgeschwindigkeit . . . . .	23
5.1	Eigenschaften der verwendeten Gase . . . . .	32
5.2	Parametrisierung der Gasflüsse . . . . .	40
5.3	Eingestellte Gasflüsse . . . . .	41
5.4	Schwankungen des Gasflusses . . . . .	42
5.5	McMillan Flußmeter . . . . .	45
A.1	Aufgezeichnete Größen . . . . .	85
A.2	Technische Daten der ADC-Module . . . . .	86
A.3	Sensordefinition . . . . .	87
A.4	Einheiten der Meßwerte . . . . .	88



# Kapitel 1

## Einleitung

Woher kommt die Welt - oder besser das uns bekannte Universum? Die Neugierde des Menschen hat ihm Möglichkeiten gegeben, Antworten auf diese Fragen zu finden. Eine etablierte Theorie, die die Entstehung des Universums beschreibt, ist die Urknall-Theorie, die von der Expansion des Weltalls aus einem einzigen Punkt ausgeht. Zu Beginn der Expansion, nach  $10^{-6}$  Sekunden, hat sich die Materie, aus der sich die heutigen Atomkerne zusammensetzen, aufgrund der enormen Dichte und der extrem hohen Temperatur wahrscheinlich in einem anderen Zustand, dem Quark-Gluonen-Plasma befunden. In diesem Zustand sind die Quarks, aus denen die Nukleonen genannten Kernbausteine aufgebaut sind, frei, d.h. nicht mehr einem einzigen Nukleon zugeordnet. Bei der Expansion kühlte sich die Materie ab und es bildeten sich die Nukleonen. Aus diesen entstanden dann die Atome, aus denen unsere heutige Welt besteht.

Die teilweise Umkehrung dieser Reaktion ist heute in Kernreaktionen an Teilchenbeschleunigern möglich. Die sich im Bau befindlichen Beschleunigeranlagen **Large Hadron Collider LHC** am **Conseil Europeen pour la Recherche Nucleaire CERN** in Europa und **Relativistic Heavy Ion Collider RHIC** am **Brookhaven National Laboratory BNL** in den USA werden Energien von mehreren  $TeV$  zur Verfügung stellen, die es ermöglichen, Kernmaterie in Zuständen zu untersuchen, wie sie  $10^{-6}$  Sekunden nach dem Urknall im Weltall herrschten. Auch die im heutigen Weltall existierenden Neutronensterne, die bei Explosionen von Supernovae entstanden, bestehen aus durch Gravitation komprimierter Kernmaterie. In ihrem Innerem können Dichten bis zur 3-fachen normalen Kerndichte  $\rho_0$  vorkommen. Bei solchen hohen Dich-

ten werden Protonen durch inversen  $\beta$ -Zerfall in Neutronen umgewandelt.

Kernmaterie, deren Dichte die der normalen Kerne überschreitet, kann man auch heute schon im Labor auf der Erde untersuchen. In Schwerionenreaktionen am **S**chwerionen **S**ynchrotron **S**IS der **G**esellschaft für **S**chwerionenfor-**S**orschung **G**SI, das Ionen von Kohlenstoff bis Uran mit einer maximalen Energie von bis zu  $2\text{ GeV}$  pro Nukleon liefert, lassen sich beispielsweise Dichten bis zur dreifachen normalen Kerndichte  $\rho_0$  und Temperaturen bis zu  $100\text{ MeV}$  in Kernreaktionen erreichen. Ein bestehendes Experiment zur Untersuchung solcher Reaktionen ist das **FOPI**-Experiment. Eine internationale Kollaboration untersucht mit diesem Detektor die Eigenschaften der Kernmaterie bei hoher Dichte und Temperatur. Durch die Untersuchung der bei der Kernreaktion emittierten Teilchen wie etwa Nukleonen, leichten Kernen sowie der im Stoß produzierten Teilchen wie Pionen oder den „seltsamen“ Kaonen, lassen sich Rückschlüsse auf den Ablauf der Kernreaktion und die Eigenschaften der Kernmaterie ziehen. Die im Nukleon-Kern-Stoß zur Erzeugung von Teilchen mindestens benötigte Energie wird Schwellenenergie genannt. Durch mehrstufige Prozesse ist im Schwerionenstoß schon bei Energien, die pro Nukleon unterhalb der Schwellenenergie liegen, die Erzeugung von Teilchen möglich. Durch Nachweis der Teilchen ist eine Untersuchung der daran beteiligten Reaktionsmechanismen möglich. Aus der Anzahl der emittierten Teilchen, der Multiplizität, läßt sich der Stoßparameter  $b$  der Reaktion bestimmen. Die Temperatur der Kernmaterie bei der Reaktion kann einerseits aus dem transversalen Massenspektrum für eine Teilchenart oder aus den Teilchenzahlverhältnissen von unterschiedlichen Teilchen bestimmt werden. Das Rapiditätsspektrum gibt Aufschluß über den Grad des „Abstoppens“ des Projektils im Zielkern. Aufgrund der Systemgröße treten beim Schwerionenstoß kollektive Effekte wie zum Beispiel Fluß auf, also eine Auszeichnung einer Richtung für die emittierten Teilchen.

Um all dies untersuchen zu können, müssen möglichst viele der bei der Kernreaktionen emittierten Teilchen nachgewiesen und eindeutig identifiziert werden, was hohe Anforderungen an das Detektorsystem stellt. Neben der Möglichkeit, zwei aus der Reaktion stammende Teilchen räumlich trennen zu können, ist die eindeutige Unterscheidung der verschiedenen Teilchenarten wichtig. Während ersteres durch eine hohe Granularität, also eine Aufteilung des Detektors in viele unabhängige Segmente erreicht wird, ist für letzteres eine hohe Massen- und Ladungstrennung in den Einzeldetektoren wichtig. Im FOPI-Detektor wird die Teilchenidentifizierung mit in einem Ma-

gnetfeld arbeitenden Driftkammern in Verbindung mit einer Flugzeitmessung erreicht. Schwankungen der Betriebsbedingungen und Alterungserscheinungen der Driftkammern wirken sich auf die Leistungsfähigkeit des Detektorsystems aus. Mit fortschreitendem Alterungsprozeß reduzieren sich Auflösung und Spannungsfestigkeit der Driftkammern, was sie unbrauchbar macht oder aufwendige Reparaturmaßnahmen erfordert. Die Hochspannungen, die für den Betrieb der Driftkammern benötigt werden, stellen ebenfalls ein großes Gefahrenpotential dar. Durch Entladungen wird das Kammergas zersetzt und die Oberflächen von Drähten zerstört, was zu verstärktem Altern führt.

Die hier vorliegende Diplomarbeit hat daher das Ziel, die Betriebsbedingungen der Driftkammern des FOPI-Detektors genau zu untersuchen, verschiedene Parameter zu messen und aufzuzeichnen, um Möglichkeiten zur Überwachung bereitzustellen, die zu einer allgemeinen Verbesserung im Betrieb der Driftkammern führen. Dazu wurden Sensoren zur Messung der folgenden Größen in das System integriert:

- Die Gasflüsse der einzelnen Komponenten sowie die Verteilung des Gasgemischs auf die Driftkammern wurden mit kommerziellen Flußmetern überwacht. Diese wurden vor dem Einbau geeicht.
- Die Gasdrücke der Driftkammern relativ zum äußeren Luftdruck sowie der absolute Gasdruck in der zentralen Driftkammer wurden mit elektronischen Drucksensoren gemessen.
- Zur Messung der Temperatur wurden im Kammergas sowie an verschiedenen anderen Stellen im Detektor Temperatursensoren angebracht.
- Ein Sauerstoffmeßgerät zur Messung des Sauerstoffgehalts im Abgas der Driftkammern wurde installiert.

Zur Aufzeichnung der Meßwerte dieser Sensoren wurde ein universelles ADC-System aufgebaut, das von einem PC periodisch ausgelesen wird, der dann die Werte darstellt und speichert. Die aufgezeichneten Werte wurden in die Experimentdatenaufnahme des FOPI-Detektors eingebunden. Mit diesem System wurden ebenfalls die schnellen Schwankungen der Potentialströme der insgesamt 40 Einzelsektoren der beiden Driftkammern gemessen. Damit sollten Hochspannungsüberschläge erkannt werden. Das System wurde in einem

dreiwöchigen FOPI-Experiment mit Erfolg eingesetzt. Die sich aus der Auswertung der dabei aufgezeichneten Daten ergebenden Erkenntnisse werden in dieser Arbeit beschrieben.

Um den Betrieb der Driftkammern sicherer zu machen, wurden außerdem elektronische Schaltungen zur Hardware-Überwachung der in den Kammern fließenden Ströme entwickelt. Diese erkennen Stromänderungen und können, falls aktiviert, die Hochspannungen abschalteten, wodurch der Betrieb der Driftkammern sicherer wurde.

Die Arbeit ist folgendermaßen aufgebaut: Nach einer Beschreibung des FOPI-Detektors und seiner Unterdetektoren werden die in einer Driftkammer zur Teilchenidentifizierung wichtigen Prozesse und die sie beeinflussenden Parameter, die in dieser Arbeit gemessen und aufgezeichnet wurden, betrachtet. Die Ursachen und Auswirkungen der Alterungen der Driftkammer werden vor der Beschreibung des Gassystems, der dort installierten Sensoren und den aufgezeichneten Meßwerten kurz diskutiert. Danach werden die an den Driftkammern aufgezeichneten Werte von Druck, Temperatur und Magnetfeld gezeigt. Ausführlicher mit der Alterung beschäftigt sich das Kapitel über die Messungen der Potentialströme der einzelnen Sektoren der Driftkammern. Die zur Überwachung der Potential- und Driftströme aufgebauten Schaltungen werden im vorletzten Kapitel beschrieben. Der Zusammenfassung folgt im Anhang die Beschreibung der verwendeten ADC und des Computers.

# Kapitel 2

## Der FOPI-Detektor

### 2.1 Aufbau des FOPI-Detektors

Der FOPI-Detektor ist in einem Cave B genannten Raum in der Experimentierhalle der GSI aufgebaut. Es handelt sich dabei um ein modulares Detektorsystem zur Untersuchung von Kernreaktionen bei Einschußenergien über einen Energiebereich von  $100 \text{ AMeV}$  bis zu  $2 \text{ AGeV}$ . Geladene Reaktionsprodukte können in einem Großteil des vollen Raumwinkels ( $4\pi$ ) nachgewiesen werden, was dem Detektor den Namen FOPI gab. Die Kernreaktion wird durch Kollision eines schweren Ions mit den Kernen einer ruhenden Ziel-Folie, dem Target ausgelöst. Dieser Aufbau wird Fixed-Target-Experiment genannt. Da sich dabei das Schwerpunktsystem der Reaktion in Vorwärtsrichtung bewegt, genügt im Laborsystem ein polarer Winkelbereich von nur  $140^\circ$  zur Erfassung des wesentlichen Raumwinkels der Reaktion. Der FOPI-Detektor ist in und um einen  $3 \text{ m}$  hohen und  $6 \text{ m}$  langen Solenoid-Magneten aufgebaut und besteht aus folgenden Unterdetektoren:

- Der Zentralen Driftkammer CDC mit einem Laborwinkelbereich von  $30^\circ$  bis  $140^\circ$
- Der Driftkammer Helitron mit einem Laborwinkel von  $7^\circ$  bis  $30^\circ$
- Dem die CDC umgebende Szintillator-Barrel mit einem Winkelbereich von  $39^\circ$  bis  $140^\circ$
- Einem Čerenkov-Barrel im Bereich von  $39^\circ$  bis  $85^\circ$

- Der Vorwärts-Wand, die sich aus verschiedenen Szintillatoren zusammensetzt. Diese sind:
  - Die Äußere Wand mit einem Winkelbereich  $7^\circ$  bis  $30^\circ$
  - Rosace  $1^\circ$  bis  $6^\circ$  und
  - Innere Wand  $1.2^\circ$  bis  $7^\circ$

Zum FOPI-Detektor gehört noch ein aus 128 Ionisationskammern zusammengesetzter Cluster-Detektor mit Namen Parabola. Cluster sind „schwere“ Fragmente aus Kernreaktionen mit Ladung  $Z \geq 3$ . Sie entstehen häufig bei Kernreaktionen mit Projektilenergien von einigen  $100 \text{ AMeV}$ . Die Parabola wurde in der Aufbauphase von FOPI, in der die Driftkammern noch nicht existierten, zusammen mit der Vorwärts-Wand in einem Experiment eingesetzt. Der Experiment-Aufbau hierzu kann z.B. in [Gob92] nachgelesen werden. Da in Kernreaktionen bei höheren Energien kaum noch Cluster erzeugt werden, wird Parabola bei solchen Experimenten nicht eingesetzt.

Abbildung 2.1 zeigt den Aufbau des FOPI-Detektors im Phase 2 genannten Ausbauzustand, wie er im Experiment eingesetzt wurde. Der Detektor ist z.B. in [Rit95] beschrieben.

### 2.1.1 Driftkammern

#### Die CDC

Die Zentrale Driftkammer **C**entral **D**rift **C**hamber CDC ist eine zylindrische Vieldraht-Driftkammer mit einer Länge von etwa  $2 \text{ m}$  und einen Durchmesser von  $1,8 \text{ m}$ . Ihre konischen Endflächen werden vom Außenzylinder gehalten und bestehen aus Stesalit. In der inneren Öffnung der CDC, die einen Durchmesser von etwa  $30 \text{ cm}$  und eine Länge von  $80 \text{ cm}$  hat, trifft der Schwereionenstrahl auf das Target. Daher ist der Innenzylinder aus mit Folie überzogenen Schaumstoff hergestellt, was den Energieverlust für Fragmente gering hält. Die das Driftfeld erzeugenden Drähte unterteilen den Innenraum radial in 16 Sektoren. Im Inneren eines Sektors befinden sich je 60 Potential- und 60 Auslesedrähte in der sogenannten Ausleseebene. Abbildung 2.2 zeigt schematisch den Aufbau der CDC. Die Ausleseebenen liegen parallel zur Strahlachse und sind radial um den „Tiltwinkel“ von  $8^\circ$  gedreht. Dabei beträgt der

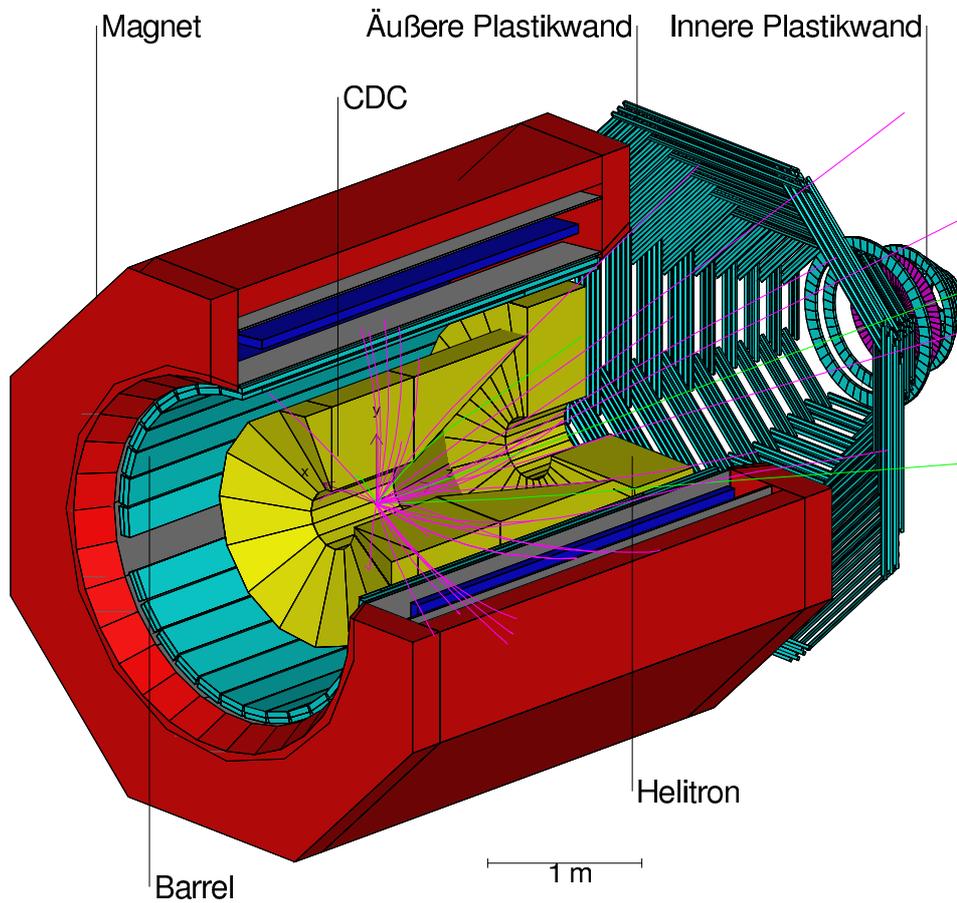


Abbildung 2.1: Die Abbildung zeigt den FOPI-Detektor im Phase 2 genannten Ausbauzustand, wie er im Experiment eingesetzt wurde. Im Inneren der supraleitenden Magnetspule befindet sich die Driftkammer CDC und in positiver z-Richtung die Driftkammer Helitron. Die CDC wird vom Szintillator-Barrel umgeben, hinter dem Helitron befindet sich die Vorwärtswand. In den Detektor sind Teilchenbahnen einer Reaktion eingezeichnet.

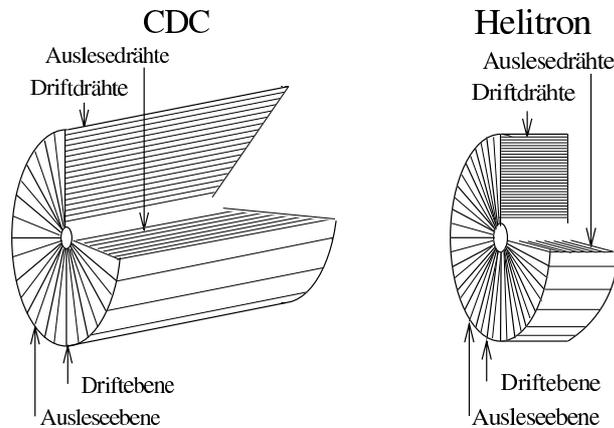


Abbildung 2.2: zeigt den schematischen Aufbau der beiden Driftkammern. Bei der links dargestellten CDC liegen die Auslese- und Driftdrähte liegen parallel zur Strahlachse. Im rechts dargestellten Helitron stehen die Auslesedrähte senkrecht zur Strahlachse. Bei beiden Kammeren werden die Sektoren von den Drift-ebenen begrenzt.

Abstand zwischen einem Potential- und einem Auslesedraht  $5\text{ mm}$ , zusätzlich sind die Auslesedrähte abwechselnd um  $200\text{ }\mu\text{m}$  aus der Ebene versetzt. Diese Anordnung wird „Staggering“ genannt. Drähte, Strahlachse und Magnetfeldrichtung sind zueinander parallel. Als Auslesedrähte dienen  $50\text{ }\mu\text{m}$  Ni/Cr-Drähte mit einem Widerstand von  $500\text{ }\Omega/\text{m}$ , die Potentialdrähte haben  $100\text{ }\mu\text{m}$  Durchmesser und sind aus einer Cu/Be-Legierung. Durch den Widerstand der Auslesedrähte und eine Signalauslese an beiden Drahtenden ist es möglich, aus dem Verhältnis der gemessenen Pulshöhen die Position längs des Drahtes zu bestimmen. Die Vorverstärker sind auf dem rückwärtigen Endkonus und in Vorwärtsrichtung außen auf dem Zylinder angebracht. Das Magnetfeld ist im Bereich der CDC bis auf  $2\%$  homogen.

### Das Helitron

Geladene Teilchen durchlaufen im Magnetfeld eine Helix-Trajektorie oder Schraubenlinie. Von diesem Begriff leitet sich der Name der zweiten Driftkammer des FOPI-Detektors ab. Das Helitron ist ein flacher Zylinder mit einem Innendurchmesser von  $42\text{ cm}$ , einem Außendurchmesser von  $198\text{ cm}$  und

einer Tiefe 60 cm. Vorder- und Rückseite bestehen aus dünner, beschichteter Kunststoffolie. Die 24 Sektoren enthalten jeweils 54 Zähl- und 53 Potentialdrähte, die im Gegensatz zur CDC radial und senkrecht auf der Strahlachse stehen. In Abbildung 2.2 ist der Aufbau des Helitrons schematisch zu sehen. Auch beim Helitron werden beide Drahtenden ausgelesen, wobei sich die dazu nötigen Vorverstärker auf dem Außenzylinder befinden. Im Bereich des Helitrons fällt die magnetische Feldstärke des Magneten bereits merklich und inhomogen ab.

## 2.1.2 Szintillatoren

### Das Barrel

Das Szintillator-Barrel umgibt in zylindrischer Geometrie die zentrale Driftkammer. Es besteht aus 180 einzelnen Szintillatorstreifen, die von beiden Seiten mit Photomultipliern ausgelesen werden. Aus dem Zeitunterschied der beiden Signale ergibt sich der Ort längs des Streifens. Die Flugzeit **Time of Flight ToF** von Reaktionsprodukten wird aus den Signalen beider Photomultiplier eines Streifens relativ zum Signal des Start-Detektors bestimmt. Der Startdetektor ist eine dünne Szintillatorfolie, die sich im Strahlrohr vor dem Magneten befindet, mehr als  $10^6$  Teilchen pro Sekunde unterscheiden kann und das Startsignal für alle Flugzeitmessungen und die Elektronik von FOPI liefert. Für interessante Reaktionen wird der Wirkungsquerschnitt aus dem Verhältnis von im Startdetektor gezählten Ionen und der gemessenen Anzahl dieser Reaktionen bestimmt.

### Die Plastikwand

Die Äußere Plastikwand besteht aus 512 beidseitig ausgelesenen Plastikszintillatoren, die Innere Plastikwand enthält 252 und die Rosace 60 Einzel-Szintillatoren. Die Plastikwand deckt den gesamten Azimut in einem polaren Winkel von 1,2 bis  $30^\circ$  ab und dient im Überlappbereich als Flugzeitdetektor für das Helitron. Daneben erzeugt sie auch das Triggersignal, das die Aufzeichnung einer im Detektor gemessenen Reaktion startet. Für das Triggersignal werden Hardware-Schwellen auf die Gesamtmultiplizität, also die Anzahl der in einer Reaktion in der Vorwärtswand registrierten Teilchen gesetzt. Dies erlaubt eine bevorzugte Aufzeichnung bestimmter Reaktionstypen.

In Abbildung 2.3 ist eine mit CDC und Barrel gemessene Kernreaktion zu sehen. Ein Ruthenium-Ion mit einer Energie  $1,69 \text{ GeV}$  pro Nukleon löste die Reaktion in einem Ruthenium-Target aus. Aus den in der CDC gemessenen Spurpunkten wurden die Teilchenbahnen rekonstruiert. Die Abbildung zeigt die große Anzahl der Teilchen, die bei einer Reaktion entstehen und nachgewiesen werden müssen.

## 2.2 Teilchenidentifikation mit dem Detektor

Mit den Driftkammern wird die Teilchenbahn und der Energieverlust der emittierten geladenen Teilchen gemessen. Aus Bahnkrümmung im Magnetfeld wird der Impuls und das Vorzeichen der Ladung des Teilchens bestimmt. In einer Auftragung von Energieverlust über Impuls ergeben sich für die verschiedenen Teilchenarten charakteristische Kurven, anhand welcher die Teilchen identifiziert werden können. Da Pionen und die sehr seltenen Kaonen bei Impulsen ab etwa  $1 \text{ GeV}/c$  minimalionisierende Teilchen sind, also etwa den gleichen Energieverlust haben, ist eine Trennung mit dieser Methode prinzipiell nicht mehr möglich. Wegen der begrenzten Auflösung und der geringen Anzahl der bei der Reaktion auftretenden Kaonen ist eine Trennung oberhalb von wenigen hundert  $\text{MeV}/c$  praktisch ausgeschlossen. Eine weitere Unterscheidungsmöglichkeit ergibt sich jedoch aus der Flugzeitmessung: Aus der mit den Szintillatoren gemessenen Flugzeit wird die Geschwindigkeit der Teilchen bestimmt, aus der sich mit dem Impuls die Masse ergibt. Der maximale Impuls, bis zu dem die Teilchen noch unterschieden werden können, wird hier von der Zeitauflösung der Szintillatoren beschränkt.

Die statistischen Prozesse, die bei der Messung von Energieverlust, Impuls und Geschwindigkeit auftreten, sowie die beschränkte Auflösung von Detektor und Elektronik verschlechtern die Teilchenidentifizierung. Schwankungen der Betriebsbedingungen der Driftkammer verschieben die Meßwerte, was zu einer weiteren Verschlechterung der Auflösung führt.

In dieser Arbeit wurden die solche Schwankungen verursachenden Größen gemessen und aufgezeichnet. Damit können die davon verursachten Effekte abgeschätzt und, da die Werte zusammen mit den Experiment-Daten aufgezeichnet wurden, auch korrigiert werden.

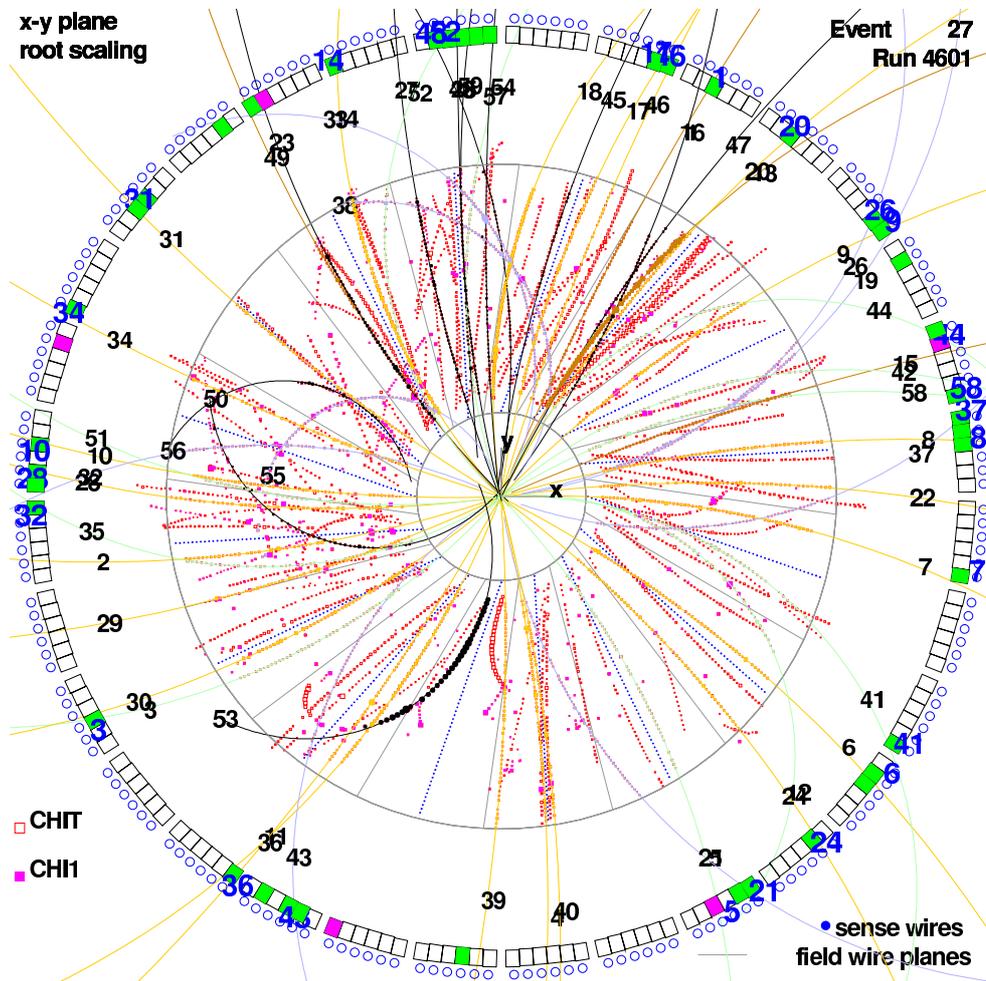


Abbildung 2.3: Die Abbildung zeigt eine im FOPI-Detektor gemessene Kernreaktion von  $^{96}\text{Ru}$  auf  $^{96}\text{Ru}$  bei einer Energie von  $1,69 \text{ AGeV}$ . Zu sehen ist die Projektion aller in der CDC gemessenen Spurpunkte in die x-y-Ebene, die daraus rekonstruierten, als Kurven eingezeichneten Teilchenbahnen, sowie die im Barrel gemessenen Treffer.



# Kapitel 3

## Driftkammern

### 3.1 Funktionsprinzip einer Driftkammer

Es gibt verschiedene Arten von gasgefüllten Driftkammern. Man kann sie unterteilen in Driftkammern, die den Durchtrittspunkt eines Teilchens durch eine Ebene bestimmen und solche, die die volle räumliche Bahn eines Teilchens verfolgen. Letztere werden als Drahtkammern, mit das Volumen durchquerenden Drähten und Time Projection Chamber's TPC, die nur an den Endflächen Auslesedrähte oder Flächen-Elektroden (Pads) besitzen, gebaut. Die im FOPI-Detektor eingesetzten Driftkammern sind zylindrische Vieldrahtdriftkammern. Daher werden in den nachfolgenden Kapiteln speziell die Prozesse betrachtet, die in solchen Driftkammern zur Teilchenidentifizierung dienen.

Zwischen dem Durchgang eines Teilchens durch eine Driftkammer und dem Vorliegen des Signals auf dem Auslesedraht laufen mehrere physikalische Prozesse ab. Durch Ionisation des Zählgases entstehen Elektronen, die in einem elektrischen Feld zu den Auslesedrähten driften. In der unmittelbaren Umgebung des Auslesedrahts setzt Gasverstärkung ein und die auf dem Draht deponierte Ladung kann gemessen werden.

In den folgenden Abschnitten sind die für die Teilchenidentifizierung wichtigen Prozesse und die sie beeinflussenden Größen zusammengestellt.

### 3.1.1 Ionisierung

Beim Durchgang durch Materie verliert ein geladenes Teilchen durch Ionisation von Atomen und Anregung von gebundenen Elektronen Energie. Für nicht allzu niedrige Teilchenenergien und Teilchen, die schwerer als Elektronen sind, kann der Energieverlust  $dE/dx$  mit der Bethe-Bloch-Formel [Leo87] beschrieben werden.

$$-\frac{dE}{dx} = 4\pi N_A r_e^2 m_e c^2 \rho \frac{Z}{A} \frac{z^2}{\beta^2} \left[ \ln \left( \frac{2m_e \gamma^2 v^2 W_{max}}{I^2} \right) - 2\beta^2 - \delta - 2\frac{C}{Z} \right]$$

Dabei sind:

- $z$  und  $v$  Ladungszahl und Geschwindigkeit des ionisierenden Teilchens, womit sich  $\beta = v/c$  und  $\gamma = 1/\sqrt{1 - \beta^2}$  ergeben
- $Z, A$  und  $\rho$  Ladungs-, Massenzahl und Dichte der Materie
- $I$  ist das Ionisationspotential, siehe auch Tabelle 5.1
- $W_{max}$  der maximale Energieübertrag in einem Stoß
- $N_A$  die Avogadrokonstante oder Loschmidt-Zahl von  $6,022 \cdot 10^{23} \text{ mol}^{-1}$
- $m_e$  und  $r_e$  Elektronenmasse und klassischer Elektronenradius  $e^2/4\pi\epsilon_0 c^2 = 2,817 \text{ fm}$
- $\delta$  und  $C$  Dichtekorrektur und Schalenkorrektur.

Im nichtrelativistischen Bereich sinkt  $dE/dx$  zunächst mit  $1/\beta^2$  ab, durchläuft ein Minimum und steigt dann wegen des logarithmischen Terms wieder an. Teilchen, deren Energieverlust in diesem Minimum liegt, werden minimalionisierende Teilchen (**Minimum Ionizing Particle MIP**) genannt. Da in den Driftkammern das Gasmisch ionisiert wird, beeinflussen dessen Zusammensetzung und Dichte den Energieverlust der Teilchen.

### 3.1.2 Elektronendrift und Driftgeschwindigkeit

Das elektrische Driftfeld bewirkt eine Beschleunigung der bei der Ionisation entstandenen freien Elektronen in Richtung der Auslesedrähte. Stöße mit den Molekülen des Kammergases bremsen die Bewegung und es stellt

sich eine konstante Driftgeschwindigkeit ein. Aus der Driftgeschwindigkeit und der Zeit, zu der die Elektronen an den Auslesedrähten ankommen, kann der Abstand der Spurpunkte zu den Drähten und daraus eine relative Teilchenbahn rekonstruiert werden. Zu einer absoluten Ortsbestimmung wird noch zusätzlich eine Absolutgröße in Ort oder Zeit benötigt. Dazu kann zum Beispiel der Vertex genannte Ort der Reaktion im Target oder eine feste Zeitreferenz dienen, wie sie vom Startdetektor geliefert wird. Die Driftgeschwindigkeit ist von der elektrischen Feldstärke, der Gaszusammensetzung und der Gasdichte abhängig. Zur Beschreibung der Driftgeschwindigkeit wird die Dichteabhängigkeit über den Druck zum reduzierten elektrischen Feld ( $E/p$ ) zusammengefaßt. Bei den sich aus Driftspannung und Geometrie der FOPI-Driftkammern ergebenden Driftfeldern von  $800\text{ V/cm}$  für die CDC und  $750\text{ V/cm}$  für das Helitron, ergeben sich Werte von  $1,07$  und  $1,00\text{ V/cm}\cdot\text{Torr}$ . Mit der verwendeten Gasmischung von  $88,52,4$  damit eine Driftgeschwindigkeit von etwa  $4\text{ cm}/\mu\text{s}$ .

### 3.1.3 Gasverstärkung

Durch die Potentialspannung und den geringen Durchmesser der mit den Vorverstärkern ausgelesenen Anoden herrscht an ihnen ein starkes elektrisches Feld, in dem Elektronen so stark beschleunigt werden, daß sie selbst wieder ionisieren können und so weitere Elektronen und positive Ionen erzeugen. Dieser Prozeß wird Gasverstärkung genannt. In Abbildung 3.1 ist der zeitliche Verlauf der Ausbildung der Elektronenlawine an einer Anode dargestellt. Nach [Leo87, Gru96] erzeugen die von der Anode wegdriftenden positiven Ionen das Signal. Durch hohe Gasverstärkung wird nachfolgend eine geringere Verstärkung benötigt, was das Signal-Rausch-Verhältnis verbessert und den Nachweis der Driftelektronen ermöglicht. Die Anzahl  $N$  der Elektronen bei der Gasverstärkung wächst exponentiell über die Strecke  $s$  und wird mit dem ersten Townsend-Koeffizienten  $\alpha$  beschrieben.

$$dN = N\alpha ds$$

Da der Townsend-Koeffizient indirekt proportional zur mittleren freien Weglänge ist, ist er von Gasdichte, Gaszusammensetzung sowie der elektrischen Feldstärke abhängig.

Die Abhängigkeiten des Gasverstärkungsfaktors  $G = N/N_0$  von den Kammerparametern wird durch die Diethorn-Formel beschrieben. Sie wurde un-

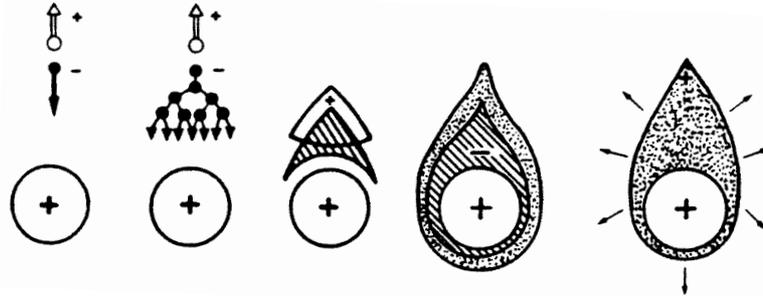


Abbildung 3.1: Die Abbildung zeigt den zeitlichen Verlauf der Ausbildung einer Elektronenlawine an einem Zählrohr [Gru96].

ter der Annahme, daß  $\alpha$  proportional zur Feldstärke  $E$  ist, für die Gasverstärkung in einem Proportionalzähler abgeleitet. Dabei ist  $N_0$  die Anzahl der primären Elektronen vor der Gasverstärkung. Die Herleitung der Formel kann in [Blu93] nachgelesen werden. Es ergibt sich:

$$\ln G = \frac{\ln 2}{\ln(b/a)} \cdot \frac{V}{\Delta V} \ln \frac{V}{\ln(b/a) E_{min}(\rho_0) \cdot (\rho/\rho_0)}$$

Dabei sind:

- $\rho_0$  und  $\rho$  normale Gasdichte bzw. Gasdichte
- $b$  und  $a$  Innen- und Drahtradius für einen Proportionalzähler
- $V$  die Betriebsspannung des Zählers
- $E_{min}(\rho_0)$  und  $\Delta V$  sind die Diethorn-Parameter

In [Blu93] sind als Diethorn-Parameter für eine 90:10 Argon-Methan-Mischung  $E_{min}(\rho_0) = 48kV/cm$  und  $\Delta V = 23,6V$  angegeben. Die Gasverstärkung hängt von der Gasdichte  $\rho$  ab, die bei offenen Systemen vom Gasdruck und Temperatur beeinflusst wird. Für kleine Dichteänderungen gilt:

$$\frac{dG}{G} \sim -\frac{d\rho}{\rho}$$

Für die Änderung der Gasverstärkung gibt [Blu93] einen Proportionalitätsfaktor zwischen 5 und 8 an.

Eine in [Kow92] beschriebene Messung der Temperaturabhängigkeit der Gasverstärkung im Bereich zwischen  $2^{\circ}\text{C}$  und  $50^{\circ}\text{C}$  für eine Argon- $\text{CO}_2$  - Gasmischung lieferte  $\Delta G/G = 5\%/^{\circ}\text{C}$ , was zu 80% über die Dichteänderung erklärt werden konnte.

Durch Messung und Aufzeichnung von Temperatur und Druck können die daraus resultierenden Änderungen der Gasdichte und damit die Auswirkung auf die Gasverstärkung bestimmt und korrigiert werden.

Die FOPI-Driftkammern werden mit Gasverstärkungen von etwa  $10^6$  betrieben. In [Sto96] wurden für das FOPI-Gasgemisch die Einflüsse verschiedener Parameter auf Driftgeschwindigkeit und Gasverstärkung gemessen. Tabelle 3.1 wurde aus dieser Arbeit entnommen und enthält die Variationen, die zu einer Änderung der Driftgeschwindigkeit  $v$  um mehr als 0,4 % beziehungsweise der Gasverstärkung  $G$  um mehr als 5 % führen. Diese Werte sind sinnvolle Anforderungen der Datenanalyse an die Konstanz der Betriebsparameter der Driftkammern. In der Tabelle fällt die starke Abhängigkeit

	$\Delta U_P/U_P$	$\Delta U_D/U_D$	$\Delta \rho/\rho$	$\Delta F_I/F_I$	$\Delta F_M/F_M$
$\frac{dv}{v} \approx 0,4\%$	12,5%	2,4%	2%	1,2%	11,6%
$\frac{dG}{G} \approx 5\%$	0,35%	0,7%	0,56%	1,7%	11,8%

Tabelle 3.1: Die Tabelle zeigt die Veränderungen für verschiedene Größen, die allein die Driftgeschwindigkeit  $v$  um  $\approx 0,4\%$  beziehungsweise die Gasverstärkung  $G$  um  $\approx 5\%$  ändern. Die Zahlen wurden aus [Sto96] entnommen.

der Gasverstärkung von der Driftspannung  $U_D$  und der Potentialspannung  $U_P$  auf. Die Effekte von Druck und Temperatur sind in der Dichte  $\rho$  zusammengefaßt. Auch die Anforderungen an die Konstanz der Gaszusammensetzung sind, wie aus den Werten für den Gasfluß von Isobutan  $F_I$  hervorgeht, hoch. Aufgrund des geringen Anteils an Methan wirkt sich eine Änderung bei  $F_M$  geringer aus. Die Werte der Tabelle können auch zur Abschätzung der Auswirkungen von nicht allzu großen Veränderungen der Parameter auf Gasverstärkung und Driftgeschwindigkeit verwendet werden.

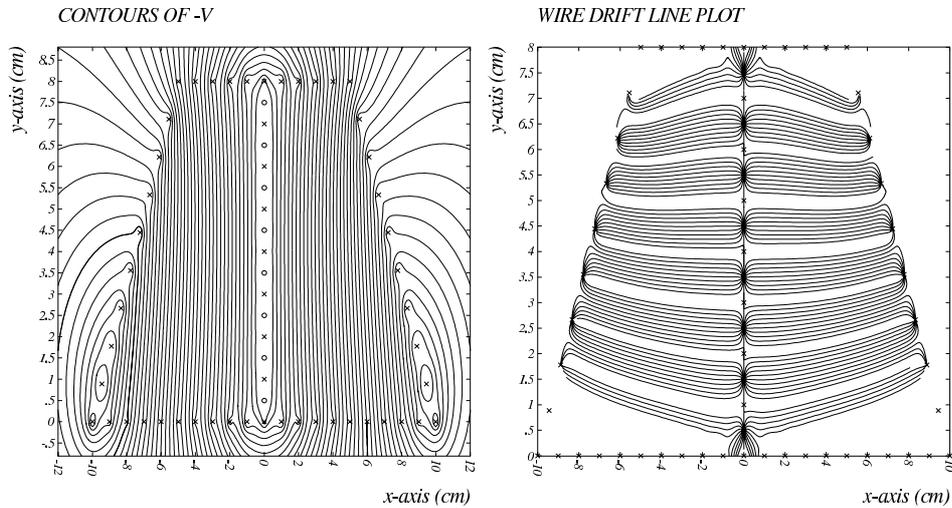


Abbildung 3.2: Das linke Bild zeigt die Äquipotentiallinien, das rechte die sich daraus ergebenden Driftwege für eine einfache Driftkammer. Die Bilder wurden mit dem Driftkammer-Simulationsprogramm Garfield von CERN erstellt.

Zur Veranschaulichung von Aufbau und Funktionsweise einer Driftkammer dient Abbildung 3.3. Sie zeigt die Skizze eines Schnittes durch eine Testkammer, die als Prototyp für einen Sektor der CDC diente. In der Mitte der Kammer befindet sich die Ausleseebene mit den Potential- und Ausleседräh ten. Die Potentialdräh te erzeugen ein starkes elektrisches Feld an den Ausleседräh ten, die über die Vorverstärker mit Erdpotential verbunden sind. In diesem Feld findet die Gasverstärkung statt. Mit dem Spannungsteiler für die Driftspannung wird trotz der trapezförmigen Geometrie ein auf der Ausleseebene senkrecht stehendes Driftfeld erzeugt. Abbildung 3.2 zeigt die Äquipotentiallinien für das Driftfeld und die sich für eine solche Geometrie für die Elektronen ergebenden Driftwege.

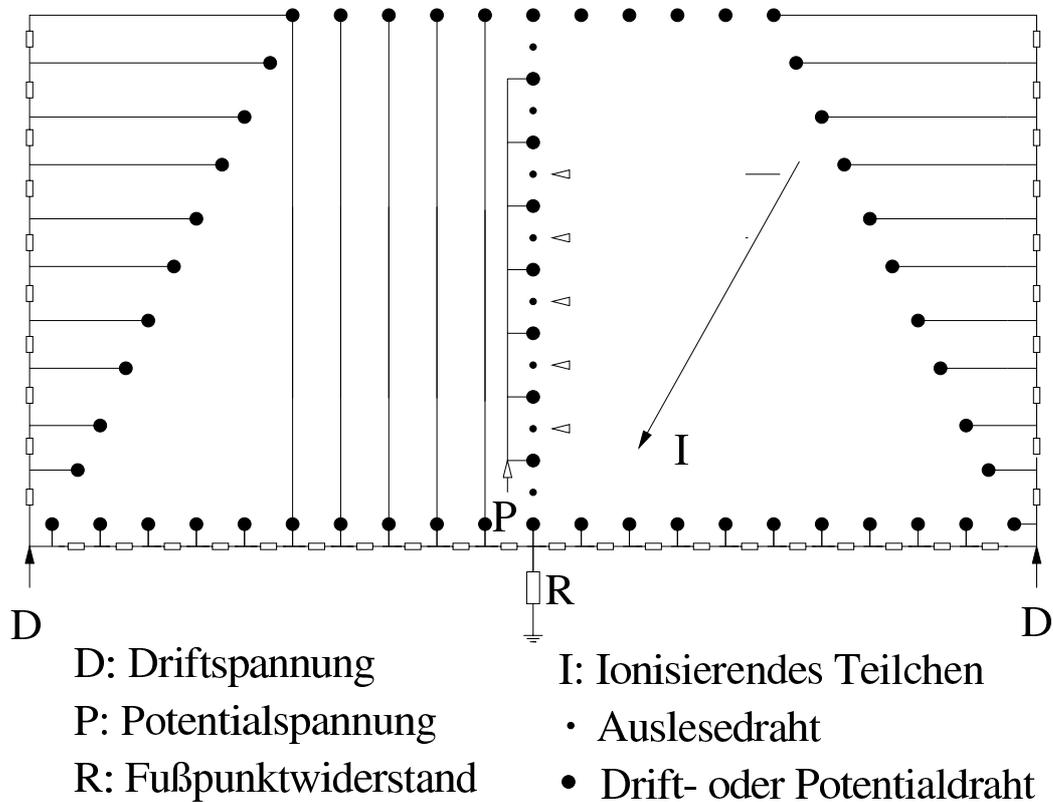


Abbildung 3.3: Driftkammer mit nur einem Sektor, wie sie als Prototyp für die CDC gebaut wurde. Mit den Spannungsteilern wird ein homogenes Driftfeld erzeugt. Am Fußpunktwiderstand **R** liegt das gleiche Potential, wie an den Potentialdrähten. Die Potential- und Auslesedrähte sind abwechselnd in der Ausleseebene in der Mitte der Kammer angeordnet. Auf der linken Seite wurden die elektrische Verbindungen für die „oberen“ Drähte, die außerhalb der Kammer verlaufen, dargestellt. Zur besseren Übersicht wurden sie für den mittleren Draht und die rechten Drähte nicht gezeichnet. Auf der rechten Seite ist der Weg eines durchgehenden Teilchens, und die zur Ausleseebene driftenden Elektronen skizziert. Nach Gasverstärkung wird die auf den Auslesedrähten deponierte Ladung über ladungsempfindliche Vorverstärker ausgelesen.

## 3.2 Driftkammern im Magnetfeld

Das Magnetfeld, das über die Krümmung der Spuren eine Impulsbestimmung für die bei der Kernreaktion emittierten Teilchen erlaubt, beeinflusst auch die Driftelektronen. Daher sollen in diesem Abschnitt die Auswirkungen des Magnetfelds diskutiert werden.

### 3.2.1 Impulsbestimmung mit dem Magnetfeld

Auf eine bewegte Ladung wirkt im Magnetfeld die geschwindigkeitsabhängige Lorentzkraft. Diese verursacht eine zu Magnetfeld und Bewegungsrichtung senkrechte Ablenkung. Bewegte, geladene Teilchen, auf die keine weiteren Kräfte wirken, werden daher auf Schraubenlinien um die Richtung des Magnetfeldes abgelenkt. Für den Radius  $\rho$  der Schraubenlinie in Metern gilt:

$$\rho = \frac{3,33 p_{\perp} c}{|q| B}$$

Dabei ist  $p_{\perp}$  die Komponente des Impulses senkrecht zur Magnetfeldrichtung in  $GeV/c$ ,  $q$  die Ladung des Teilchens in Einheiten der Elementarladung  $e$  und  $B$  die Stärke des Magnetfelds in Tesla. Da beim FOPI-Detektor Magnetfeldachse und Strahlrichtung parallel sind, ist die Impulskomponente senkrecht zur Magnetfeldachse auch der Transversalimpuls des Teilchens. Aus der Richtung in die das Magnetfeld die Bahn des Teilchens ablenkte, ergibt sich das Vorzeichen der Ladung. Mit dem Steigungswinkel  $\lambda$  der Schraubenlinie, der hier auch gleich dem Polarwinkel ist, kann über  $p_{\perp} = p \cos \lambda$  der Gesamtimpuls  $p$  bestimmt werden.

### 3.2.2 Auswirkung des Magnetfelds auf die Driftelektronen

Das  $\vec{B}$ -Feld wirkt auch auf die im  $\vec{E}$ -Feld driftenden Elektronen und verursacht eine Ablenkung. Diese Ablenkung kann mit dem Lorentzwinkel  $\psi$  beschrieben werden, der außer vom  $\vec{B}$ -Feld von der Driftrichtung und der Driftgeschwindigkeit abhängt. Für ein auf dem  $\vec{B}$ -Feld senkrecht stehendes Driftfeld  $\vec{E}$  gelten die folgenden Abhängigkeiten [Blu93]:

$$\tan \psi = \omega \tau$$

$$\tau = \frac{1}{N\sigma v}$$

Dabei ist  $\tau$  die charakteristische Zeit und  $\omega = e \cdot B/m$  die Zyklotronfrequenz des Elektrons. Die charakteristische Zeit, also die Zeit zwischen zwei Stößen, wird vom der Gasdichte  $N$ , dem Wirkungsquerschnitt  $\sigma$  und der Driftgeschwindigkeit  $v$  beeinflusst. Tonks' Theorem [Ton55], das besagt, daß nur die elektrische Feldkomponente in Driftrichtung die Driftgeschwindigkeit bestimmt, gibt den Zusammenhang zwischen der Driftgeschwindigkeit mit und ohne Magnetfeld an.

### 3.3 Unterscheidung von Spur und Spiegelspur

Da das Driftfeld symmetrisch um die Auslesedrähte ist, läßt sich zunächst aus den gemessenen Signal nicht entscheiden, von welcher Seite die Elektronen zur Ausleseebene drifteten, d.h. ob die Spur links oder rechts der Zähldrähte verlief. In Abbildung 2.3 ist dies an den in der CDC rekonstruierten Spurpunkten zu sehen. Zur Unterscheidung der wahren Spur von der Spiegelspur gibt es mehrere Möglichkeiten. Bei der CDC kann der „Tilt-Winkel“ zur Unterscheidung benutzt werden. Während eine wahre Spur durch den Vertex als den Punkt der Reaktion im Target laufen muß, zeigt die Spiegelspur mit dem doppelten Tilt-Winkel daran vorbei.

Eine weitere Möglichkeit ergibt sich aus dem „Staggering“, also den abwechselnd aus der Ausleseebene heraus versetzten Auslesedrähten, das in beiden Driftkammern vorhanden ist und ein charakteristisches „Muster“ in der Driftzeit liefert. Da die Sektoren des Helitrons keinen Tilt-Winkel besitzen, ist das Staggering dort besonders wichtig.

Auch der vom Magnetfeld verursachte Lorentzwinkel liefert bei die Kammer verlassenden Spuren ein Unterscheidungsmerkmal. Eine Spur, die Signale mit einem Driftweg außerhalb der Kammer besitzt, muß eine Spiegelspur sein.

Bei Spuren, die einen Sektor einer Driftkammer verlassen, findet sich nur bei der wahren Spur eine Fortsetzung im nächsten Sektor.



# Kapitel 4

## Probleme der Driftkammern

Die Driftkammer CDC mußte 1996 wegen Alterungseffekten geöffnet und gereinigt werden. Diese Alterungseffekte zeigten sich in einer schlechten Auflösung, vor allem jedoch in Entladungen und hohen Strömen in der Driftebene, die ein Erreichen der nominellen Driftspannung nicht mehr erlaubten. Nach dem Öffnen der Driftkammer wurden an den Drähten „verbrannte“ Stellen, kohlenstoff- und siliziumhaltige Ablagerungen sowie „Fäden“ von mehreren *mm* Länge gefunden. Abbildung 4.1 zeigt Mikroskopaufnahmen von einem Drift- und einem Auslesedraht aus der CDC. Die kristallinen Ablagerungen auf dem Auslesedraht wurden mittels Röntgenspektroskopie als Silber identifiziert. Bemerkenswert ist die im Vergleich zum Drahtdurchmesser beachtliche Größe und die Ausrichtung der Kristalle. Als Quelle für die Silberatome werden durch Hochspannungsentladungen verursachte Sputterprozesse an den silberhaltigen Leiterbahnen in den Endkonussen der CDC vermutet, was durch die dort vorhandenen „verbrannten“ Stellen bestätigt wird. Das zweite Bild zeigt einen Draht aus der Driftebene mit Staub- oder Polymerfasern und als „Dickenunterschiede“ erkennbare, siliziumhaltige Ablagerungen.

Das alte Gassystem besaß lange Gaszuführungen aus Kunststoffschläuchen und mit Silikon-Öl gefüllte „Bubblers“ zeigten den Differenzdruck der Kammer zur Umgebung an. Silikonöl wird als Quelle für die siliziumhaltigen Ablagerungen angesehen. Da aufgrund des Aufbaus der Driftkammern nur geringe Differenzdrücke möglich sind, beschränkten die geringen Leitungsquerschnitte der zum Gastransport verwendeten Kunststoffschläuche die Frischgaszufuhr. Von den Schläuchen wird ebenfalls vermutet, da sie an verschiedenen Stellen Verfärbungen zeigten, daß sie nicht für die Verwendung mit



Abbildung 4.1: Auf dem linken Bild ist ein Auslesedraht der CDC mit Silberablagerungen zu sehen. Die Abbildung rechts zeigt einem Draht aus der Driftebene mit verschiedenen Ablagerungen. Die „Verdickungen“ werden von einer siliziumhaltigen Verbindung verursacht [Sch96].

einer Argon-Isobutan-Methan-Mischung geeignet sind. Alterungserscheinungen, die von geringen Mengen von Silizium-Verbindungen und Weichmachern aus Kunststoffen verursacht wurden, sind zum Beispiel in [Blu93, Kad91] beschrieben.

Aus diesen Gründen wurde beschlossen, ein verbessertes Gassystem zu bauen, was im nachfolgenden Kapitel beschrieben wird. Dabei sollte auch die Konstanz der Gaszusammensetzung durch neue Regelventile verbessert werden, da die zur Erzeugung der Gasmischung verwendeten elektronischen BROOKS Mass-Flow-Controller älterer Bauart relativ große Soll-Istwert-Abweichungen zeigten.

Da beide Driftkammern unter Belastung zu Hochspannungsentladungen neigen und diese ebenfalls Ursachen für die oben genannten Effekte sind, sollte die Erkennung von Entladungen beim Betrieb der Driftkammern verbessert werden.

# Kapitel 5

## Das neue Gassystem

### 5.1 Das FOPI-Gasgemisch

Wie in Kapitel 3 dargestellt werden die Prozesse der Signalerzeugung in einer Driftkammer von vielen Parametern beeinflusst. Eine wichtige Komponente für die Funktion einer Driftkammer ist das Gasgemisch, von dem Ionisation, Driftgeschwindigkeit, Gasverstärkung, aber auch die Durchschlagfeldstärke und das Alterungsverhalten abhängen.

#### 5.1.1 Zusammensetzung des Gasgemischs

Die für die FOPI-Driftkammern verwendete Gasmischung setzt sich aus 88,5 % Argon, 9,1 % Isobutan, 2,4 % Methan und einer geringen Menge von etwa 3000  $\text{ppm}^1$  Wasserdampf zusammen. Dabei beschreiben die genannten Zahlen Volumenanteile bei Raumtemperatur. Einige wichtige Eigenschaften der verwendeten Gase sind in Tabelle 5.1 zusammengestellt.

Die organischen Komponenten Isobutan und Methan absorbieren Photonen, die bei der Gasverstärkung entstehen und sorgen dadurch für eine räumliche und zeitliche Begrenzung der sich ausbildenden Elektronenlawine. Sie reduzieren zwar einerseits die Gasverstärkung etwas, erhöhen aber andererseits die Durchschlagfeldstärke des Gasgemischs [Cha79], so daß sich insgesamt eine höhere Gasverstärkung als in reinem Argon erreichen läßt. Aufgrund der unterschiedlichen Eigenschaften der einzelnen Komponenten

---

<sup>1</sup>ppm = parts per million = Teilchen pro Million.

Gas	Argon	Isobutan	Methan
Verwendung	Zählgas	Quencher	Quencher
Zusammensetzung	Ar	$(\text{CH}_3)_2\text{CHCH}_3$	$\text{CH}_4$
Massenzahl A	39,95	58,12	16,04
Ladungszahl Z	18	34	10
Dichte $\rho_0$ [ $10^{-3}\text{g/cm}^3$ ]	1,662	2,416	0,668
$I_0$ [eV]	15,76	10,55	12,71
I [eV]	181,6	50,56	44,13
$-(dE/dx)_{min}$ [keV/cm]	2,541	5,402	1,608
Siedepunkt [K]	87,3	266,3	111,7

Tabelle 5.1: Eigenschaften der im FOPI-Gasgemisch verwendeten Gase. Dabei ist  $I_0$  die erste Anregungsenergie, I das Ionisationspotential und  $-(dE/dx)_{min}$  der minimale Energieverlust aus der Bethe-Bloch-Formel. Die angegebenen Werte wurden [Ull85, Zar89] entnommen und gelten bei einem Druck von  $10^5 \text{ Pa}$  und einer Temperatur von  $20^\circ\text{C}$ .

beeinflusst die Gaszusammensetzung entscheidend Driftgeschwindigkeit, Gasverstärkung und Energieauflösung der Driftkammern.

Die Gasmischung wurde in [Sto96] mit verschiedenen anderen gebräuchlichen Gasmischungen verglichen und der Einfluß von Änderungen der Gaszusammensetzung und Schwankungen des Gasdrucks auf Gasverstärkung und Driftgeschwindigkeit untersucht.

### 5.1.2 Beimischung des Wassers

Die FOPI-Gasmischung enthält einen geringen Anteil Wasser, welches durch seine Leitfähigkeit Aufladungen in den Driftkammern vermindern soll. Die Aufladungen beschleunigen vor allem über den in Abschnitt 7.1 beschriebenen Malter-Effekt das Altern der Driftkammern.

Das Wasser wird durch Einleiten einer Teilmenge des Argons in eine Waschflasche beigemischt. Unter der Annahme, daß sich die verwendeten Gase wie ideale Gase verhalten läßt sich der Wassergehalt in der Gasmischung abschätzen. Für Isobutan und Wasser, deren Siedepunkte nahe bei der Raumtemperatur liegen, ist das ideale Gas jedoch nur eine grobe Nähe-

Die aus [Ull85] entnommenen Werte für den Dampfdruck zwischen  $0^\circ\text{C}$  und  $30^\circ\text{C}$  sind in Abbildung 5.1 logarithmisch über  $1/T[\text{K}]$  aufgetragen. Der Dampfdruck  $p_w[\text{hPa}]$  von Wasser kann mit einer Boltzmann-Verteilung wie folgt parametrisiert werden:

$$p_{\text{Dampf}} = p_0 e^{-W/kT}$$

Eine Anpassung an die Werte liefert  $p_0[\text{hPa}] = e^{21,38}$  und  $W/k = 5344,8 \text{ K}$ .

Um ein späteres Kondensieren des Wassers in den Leitungen zu vermeiden, wurde das Wasser mit einem geregelten Kühlgerät auf  $+10^\circ\text{C}$  gekühlt, wodurch auch die Temperatur stabilisiert werden konnte. Im Gleichgewicht setzt sich der Druck  $p$  über dem Wasser, der in etwa dem atmosphärischen Luftdruck entspricht, aus dem Partialdruck von Wasser  $p_w$ , der bei  $10^\circ\text{C}$  bei  $12,3 \text{ hPa}$  liegt und dem Druck des Argons zusammen. Da Partialdrücke und Volumenanteile äquivalent sind, kann man dies durch einen Volumen-Verhältnis von  $p_w/(p - p_w)$  Wasserdampf ausdrücken. Ein  $\text{mol}$  eines idealen Gases, enthält  $N_A \cdot 1 \text{ mol} = 6,022 \cdot 10^{23}$  Teilchen und nimmt bei Normbedingungen, also einer Temperatur von  $0^\circ\text{C}$  und einem Druck von  $1013,25 \text{ hPa}$  ein Volumen von  $22,4 \text{ l}$  ein. Über das Molvolumen von  $22,4 \text{ l/mol}$  sind also Teilchenzahl und Volumen miteinander verbunden. Daher läßt sich die Wasserkonzentration  $W$  mit folgender Formel berechnen:

$$W = \frac{N_{\text{H}_2\text{O}}}{N_{\text{ges}}} = \frac{p_w}{p - p_w} \frac{F_{\text{Ar}}}{F_{\text{ges}}}$$

Dabei sind  $N$  die Teilchenzahlen,  $F_{\text{Ar}}$  der Gasfluß durch das Wasser,  $F_{\text{ges}}$  der gesamte Gasfluß,  $p_w$  der Dampfdruck des Wassers, und  $p$  der Absolutdruck. Für einen Argonfluß von  $320 \text{ ml/min}$ , einen Gesamtfluß von  $2,6 \text{ l/min}$  und einen Luftdruck von  $1,013 \text{ hPa}$  ergibt sich somit ein Wassergehalt von etwa  $1500 \text{ ppm}$ . Aus dem nach dem Experiment gemessenen Wasserverbrauch ergab sich eine doppelt so große Wasserkonzentration. Da das Argon mit Raumtemperatur in das Wasser eintritt und auch die Waschflasche nicht vollständig

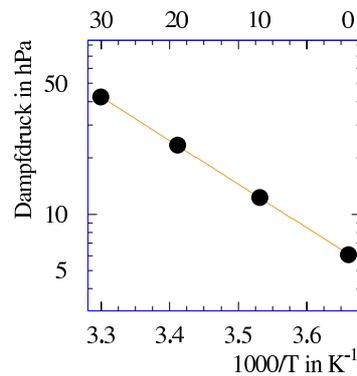


Abbildung 5.1: Dampfdruckkurve von Wasser[Ull85].

vom Kühlwasser bedeckt war, kann dies über eine höhere Temperatur zu einem höheren Dampfdruck geführt haben. Auch vom Gas mitgerissene kleinste Wassertröpfchen können die Ursache für eine höhere Wasserkonzentration sein.

## 5.2 Das neue Gassystem

Um die Gasqualität zu erhöhen und damit die Betriebsbedingungen der Driftkammern zu verbessern, wurde ein neues Gassystem aufgebaut, das in Abbildung 5.2 schematisch dargestellt ist. Die produzierte Gasmenge teilt sich auf die Driftkammern auf und wird nach dem Durchgang durch die Kammern in die Außenluft abgegeben.

Da der komplizierte, mehrstufige Prozeß, der zum Nachweis und der Identifizierung von Teilchen in den Driftkammern führt, von vielen Parametern beeinflusst wird, ist es notwendig, diese genau zu kontrollieren. Einige davon, wie die Gaszusammensetzung, lassen sich dabei beeinflussen, andere, wie etwa die Gasdichte, die von weiteren Größen abhängt, kann nur bedingt beeinflusst werden. Hier können nur die Änderungen beobachtet und für eine nachträgliche Korrektur aufgezeichnet werden. Ein erster Schritt, um die Anzahl der Variablen zu reduzieren, ist eine möglichst gute Stabilisierung der beeinflussbaren Größen, wozu vor allem die Gaszusammensetzung gehört. Es wurden daher digitale BROOKS Mass-Flow-Controller neuerer Bauart mit einer Genauigkeit von 0.75% zur Dosierung der einzelnen Komponenten ausgewählt. Für diese wurden Eichkurven, die in Abbildung 5.3 gezeigt sind, erstellt. Während des FOPI-Experiments wurden die Flüsse der einzelnen Gaskomponenten kontinuierlich aufgezeichnet. Zusätzlich wurden mit Proportionalzählern die Gasverstärkung der Gasmischung und des Abgases der Kammern gemessen. Zur Messung der Driftgeschwindigkeit  $v_D$  wurde der Driftgeschwindigkeitsmonitor **Pulse Height and Drift Velocity Monitor PHIDOO**, der in [Sto96] beschrieben ist, eingesetzt.

Die Eigenschaften der Gasmischung in den Driftkammern unterscheiden sich geringfügig von denen des produzierten Gasgemischs. Ursachen dafür sind unter anderem:

- Zusätzliche Komponenten mit anderen Eigenschaften, wie Ausgasungsprodukte aus Kunststoffen, die ins Gas gelangen.

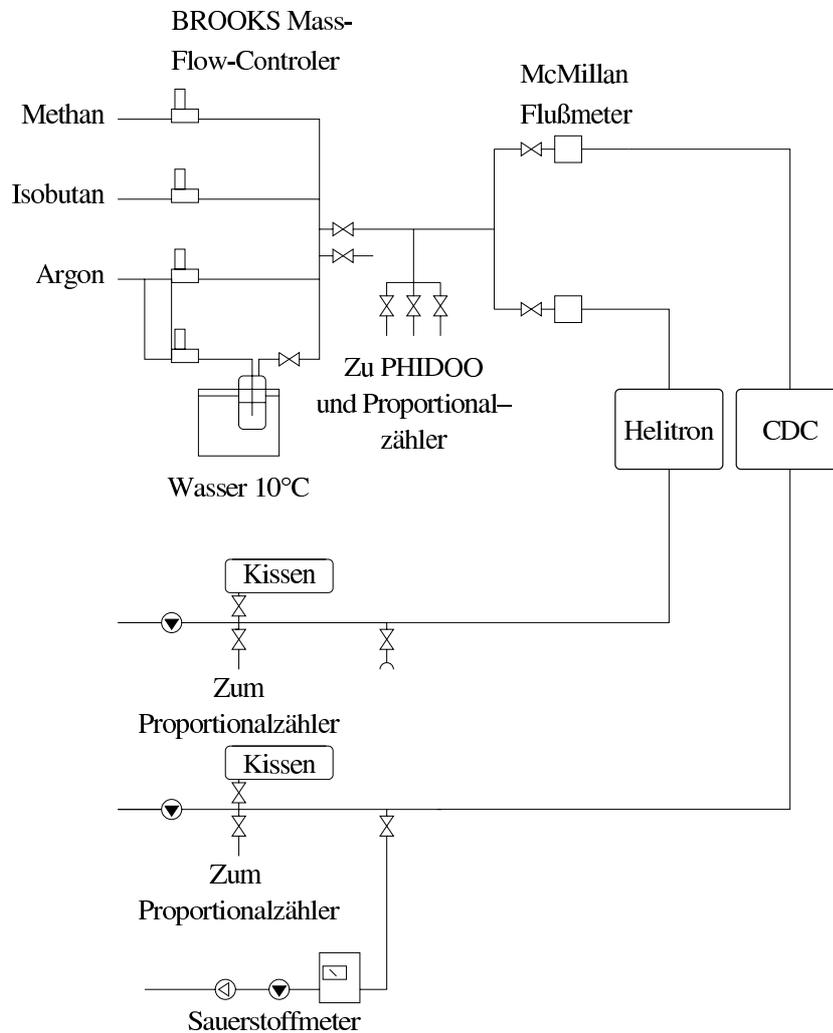


Abbildung 5.2: Gassystem der Driftkammern des FOPI-Detektors. Die einzelnen Gase werden mit BROOKS Mass-Flow-Controllern dosiert. Die Verteilung des Gasgemischs auf die Driftkammern wird mit McMillan Flußmetern gemessen. Mit verschiedenen Testzählern und einer Sauerstoffmessung wird die Gasqualität gemessen. Die „Kissen“ in den Abgasleitungen stabilisieren den Druck im System.

- Eindiffundierter Luftsauerstoff führt zusammen mit dem Wasser zu einer hohen Rekombination von Ladungsträgern und damit einer Verminderung der Zahl der Driftelektronen.
- Prozesse während der Lawinenbildung und in stärkerem Maße Hochspannungsentladungen zersetzen die organischen Bestandteile des Kammergases, was ebenfalls zu neuen Verbindungen mit anderen Eigenschaften führt.

Die ersten beiden Punkte können durch eine geeignete Wahl der im Gassystem verwendeten Materialien verbessert werden. So wurden beim Aufbau des neuen Gassystems Edelstahlrohre für die Gaszuführungen und die Abgasleitungen eingesetzt. Dies ist insbesondere wegen der langen Wege zwischen der Mischapparatur, die zu Überwachungszwecken zugänglich sein muß, und den Driftkammern notwendig.

Durch eine gleichmäßige Zufuhr von Frischgas kann die Gasqualität in den Driftkammern konstant gehalten werden. Um hier den Gasfluß kontrollieren zu können, wurde in die Gaszuführungen beider Driftkammern je ein McMillan Flußmeter eingebaut.

Zur Stabilisation des Differenzdrucks zwischen Driftkammern und Umgebungsluft sind an den Abgasleitungen mit einem geringem Gewicht beschwerte Foliensäcke angebracht. Diese „Kissen“ verhindern auch bei kurzen Unterbrechungen der Gasversorgung ein Eindringen von Umgebungsluft in das System.

Der Druck im Gassystem wurde über den Flußwiderstand der Abgasleitungen eingestellt, mit dem auch die Gasverteilung auf die Driftkammern geregelt wird.

## 5.3 Erzeugung des Gasgemischs

Die einzelnen Komponenten des Gasgemischs werden mit insgesamt vier digitalen BROOKS Mass-Flow-Controller des Typs 5850 [Bro94] dosiert. Wie in Abschnitt 5.1.2 beschrieben, wird das Wasser durch Aufteilen der Argonmenge beigemischt.

Die BROOKS Mass-Flow-Controller bestehen aus einem thermischen Gas-mengen-Sensor, einem elektromagnetisch gesteuerten Ventil und einer digitalen Regel-Elektronik, die das Ventil nach dem zwischen 0 und 5 Volt liegenden, möglichen Sollwert steuert. Der Gasmengensensor bestimmt mit der Wärmekapazität des vorbeifließenden Gases die Gasmenge. Der gelieferte Gasfluß hängt über Temperatur und Luftdruck mit der Gasmenge zusammen.

Zur Messung des von den Mass-Flow-Controllern erzeugten Gasflusses diente ein Flußmeter der Firma Bioblock. Das Gerät mißt in einem Glaszylinder von konstantem Querschnitt mit zwei Lichtschranken die Geschwindigkeit einer vom Gas mitbewegten Seifenmembran. Der sich daraus ergebende Gasfluß wird digital in  $l/min$  angezeigt. Verwendet wurde ein Gerät mit einem Gesamtmeßbereich von  $5-5000 ml/min$ , wobei sich nur bis etwa  $2000 ml/min$  reproduzierbare Resultate ergaben. Bei konstantem Gasfluß wurden in mehreren wiederholten Messungen um weniger als etwa 1 % schwankende Werte angezeigt. Daher wurde der Mittelwert aus mehreren Meßwerten gebildet. Ein Vergleich mit einem auf dem gleichen Meßprinzip basierenden Gerät des Typs Gilibrator zeigte weniger als 0,5 % Differenz zwischen den gemittelten Meßwerten der beiden Geräte. Die Tensidlösung, mit der die Seifenmembran gebildet wird, verändert unter dem Einfluß von Isobutan ihre Eigenschaften. Nach längerer Einwirkung des Isobutans wird das Erzeugen der Seifenmembran schwieriger und die Membran löst sich schon vor Erreichen der Lichtschranken auf.

Zur Spannungsversorgung und Bedienung der BROOKS Mass-Flow-Controller werden externe Reglerkarten des Typs BROOKS 0150/03 [Wes96] mit 3-stelligem Digital-Potentiometer verwendet. Das Potentiometer dient zur Vorgabe des Sollwerts für die Mass-Flow-Controller in Schritten von 0,1 % des Maximalwertes.

Da die reproduzierbare Einstellung des Sollwerts der erste Schritt für reproduzierbare Ergebnisse ist, wurde die Ausgangsspannung einer Karte, also der Sollwert, bei angeschlossenem Mass-Flow-Controller gemessen. Die

Spannung hat eine Nullpunktverschiebung von  $+11,6\text{ mV}$  und steigt dann reproduzierbar in Schritten von  $50,0\text{ mV}$  pro  $\%$ . Die als Sollwert an den Mass-Flow-Controller gelieferte Spannung  $U$  in Abhängigkeit zur Einstellung des Potentiometers  $S$  kann mit der folgenden Formel beschrieben werden:

$$U = 0,0116\text{ V} + 0,0500\text{ V} \cdot S[\%]$$

Die Spannungen wurden mit einem Präzisionsvoltmeter des Typs Fluke 45, das eine Genauigkeit besser als  $0,04\%$  besitzt und im  $100\text{ mV}$ -Meßbereich eine Auflösung von bis zu  $1\text{ }\mu\text{V}$  erzielt. Mit diesem Gerät wurden auch die anderen Spannungsmessungen in dieser Arbeit vorgenommen.

Der wie oben beschrieben, vom Gasmengensensor bestimmte Meßwert des aktuellen Gasflusses wird in eine Spannung zwischen  $0$  und  $5\text{ V}$  umgesetzt und an einer Digitalanzeige der Reglerkarte in  $\%$  des Maximalflusses angezeigt. Dieser Istwert entspricht bis auf Regelschwingungen dem eingestellten Sollwert. Wird der Mass-Flow-Controller ohne Gasdruck betrieben, fließt also kein Gas, zeigt die Anzeige der Reglerkarte  $0,0$  oder negative Werte bis  $-0,3\%$  an.

Für die entscheidende Eichung des produzierten Gasflusses als Funktion des digital eingestellten Sollwertes wurde dieser in Stufen erhöht und der Gasfluß mit dem erwähnten Bioblock-Flußmeter gemessen. Die Schrittweite betrug anfangs  $0,1\%$ , bei höheren Werten wurden größere Schrittweiten verwendet. Dabei zeigte sich, daß die einzelnen BROOKS Mass-Flow-Controller erst ab einem bestimmten Wert einen Gasfluß produzieren. Der Wert zeigt eine Hysterese und liegt je nach Gerät zwischen  $2\%$  und  $6\%$  des möglichen Maximalflusses. Nachdem das Ventil einmal geöffnet hat, können auch geringere Gasflüsse produziert werden, das Verhalten ist jedoch nicht stabil.

Oberhalb dieses Wertes ist das Verhältnis zwischen Soll- und Istwert annähernd linear. Die vor und nach dem Experiment aufgenommenen Meßwerte sind in Abbildung 5.3 zusammengefaßt.

Durch Anpassen einer linearen Funktion wurden für die relevanten Bereiche aus den Meßwerten Steigung  $S$  und Nullpunkt-Verschiebung  $N$  bestimmt. Der Gasfluß ergibt sich aus dem eingestellten Sollwert nach folgender Formel:

$$\text{Gasfluß}[ml/min] = N[ml/min] + S[(ml/min)/\%] \cdot \text{Sollwert}[\%]$$

Die entsprechenden Werte sind in Tabelle 5.2 aufgeführt.

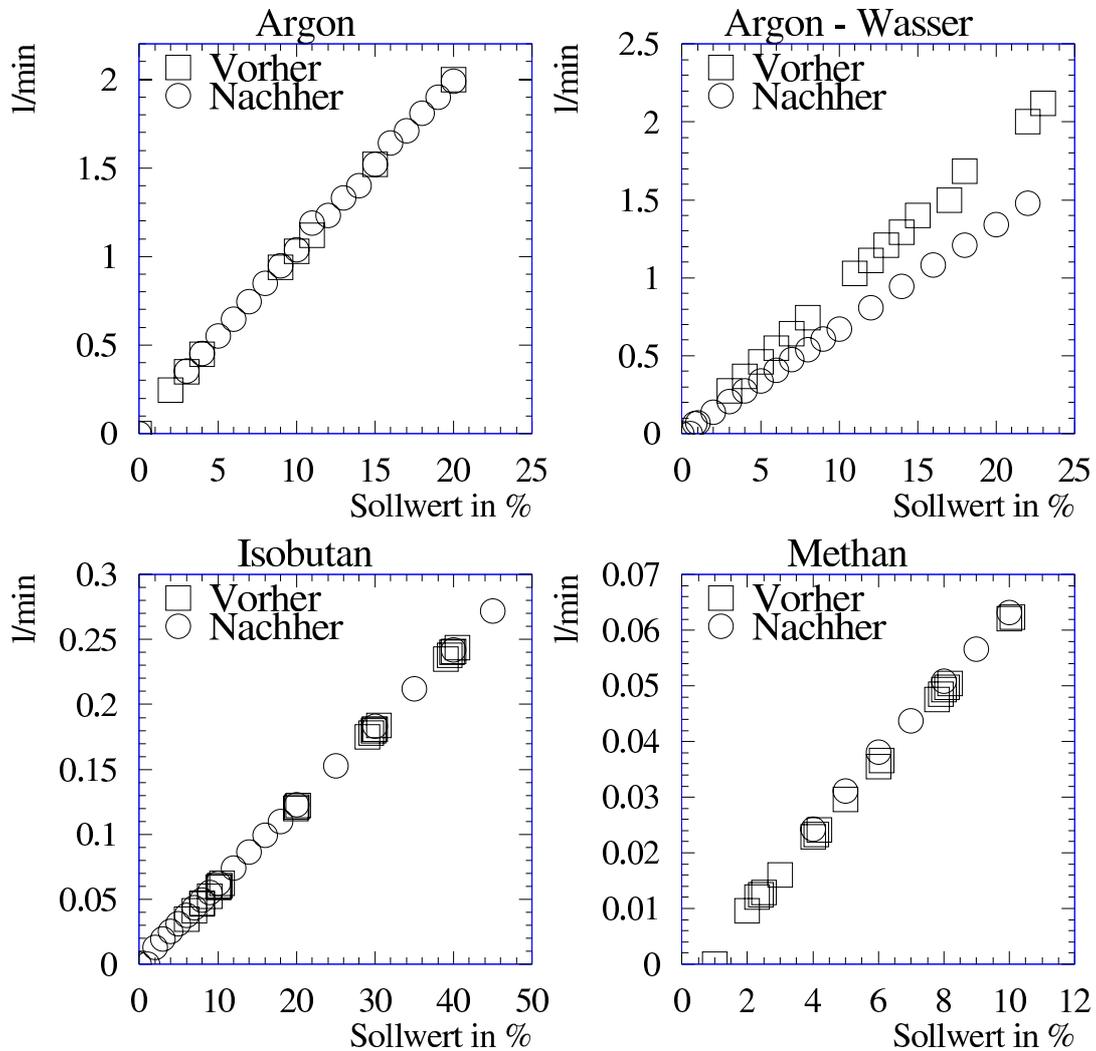


Abbildung 5.3: Die Bilder zeigen den gemessenen Gasfluß in  $l/min$  über dem eingestellten Sollwert in % für die verwendeten BROOKS Mass-Flow-Controller. Die Quadrate kennzeichnen die vor, Kreise die nach dem Experiment gemessenen Werte. Das zur Beimischung des Wassers verwendete Gerät wurde an den Hersteller zurückgeschickt, da es einen zu hohen Gasfluß lieferte.

Gas	Argon	Isobutan	Methan	Argon - Wasser
Maximalfluß [ml/min]	10000	600	600	6000
Start [%]	2	6	2,5	3
Bereich [ml/min]	350-2000	35-300	24-70	60-600
$N_{vor}$ [ml/min]	62,8	-1,9	-3,6	
Fehler N	2,6	2,0	0,2	
$S_{vor}$ [(ml/min)/%]	96,35	6,10	6,59	
Fehler S	0,44	0,02	0,03	
$N_{nach}$ [ml/min]	85,0	1,2	-1,6	8,3
Fehler N	0,6	0,2	0,4	0,3
$S_{nach}$ [(ml/min)/%]	95,63	6,05	6,50	66,05
Fehler S	0,04	0,02	0,06	0,15

Tabelle 5.2: Die Tabelle zeigt für die BROOKS Mass-Flow-Controller neben dem vom Hersteller definierten Maximalfluß den minimal einstellbaren Fluß (Start) sowie die Parameter Steigung  $S$  und Nullpunktverschiebung  $N$  für die angegebene Formel. Diese wurden durch Anpassung einer linearen Funktion an die vor und nach dem Experiment gemessenen Werte im angegebenen Bereich bestimmt. Die Fehler wurden bei der Anpassung ermittelt.

Mit diesen Parametern lassen sich die einzustellenden Werte für die vom Experiment vorgegebenen Gasmengen berechnen. Die vor und nach dem Experiment durchgeführten Messungen liefern in der Anpassung etwas unterschiedliche Werte, die wohl durch Offset-Verschiebungen über die Zeit von mehreren Wochen verursacht wurden. Für die praktische Anwendung sind die unterschiedlichen Parametrisierungen ohne Bedeutung, da sie Differenzen führen, deren Überprüfung innerhalb der Fehlergrenzen der Flußmessung liegt.

Das zur Beimischung des Wassers bestellte Gerät lieferte einen um 50% zu hohen Gasfluß und wurde deshalb an den Hersteller zur Reparatur geschickt. Es kam kurz vor dem Experiment zurück, so daß die Eichkurve erst nachträglich erstellt werden konnte.

Für das Experiment wurde eine Mischung mit 88,5% Argon, 9,1% Isobutan und 2,4% Methan verwendet. Die dazu nötigen Einstellungen sind in

Gas	Gewählt	Eingestellt	Gemessen
Argon	2,00l/min	20,0%	1,99 ± 0,01 l/min
Isobutan	240ml/min	39,8%	241 ± 1 ml/min
Methan	62,1ml/min	10,0%	63,2 ± 0,3 ml/min
Argon - Wasser	≈ 300ml/min	4,7%	319 ± 3 ml/min

Tabelle 5.3: Die Tabelle zeigt die für die Driftkammern gewählten Gasflüsse, die dazu eingestellten Werte, und die nach dem Experiment gemessenen Gasflüsse.

Tabelle 5.3 zusammen mit den tatsächlich gemessenen Flüssen angegeben.

Um Veränderungen in der Gaszusammensetzung erkennen zu können, wurden die Istwerte der Sensoren der Mass-Flow-Controller mit speziellen Analog to Digital Convertern ADC digitalisiert und von einem Computersystem aufgezeichnet. Das Computersystem, die ADC und das dazu verwendete Programm werden im Anhang beschrieben.

Zuerst war geplant, die Gasflüsse mit externen Flußmetern, wie sie auch zur Messung der Gasverteilung auf die Driftkammern verwendet wurden, zu messen. Da sich bei den verwendeten Flußmetern nach dem Einbau durch mechanische Spannung verursachte Risse und Undichtigkeiten zeigten, wurden diese Flußmeter wieder entfernt und die von den Gasmengensensoren der BROOKS Mass-Flow-Controllern gelieferten Spannungen mit einer Auflösung von 1 mV digitalisiert. Mit den vorher bestimmten Umrechnungsfaktoren wurden dann daraus die Gasflüsse berechnet. Der zeitliche Verlauf des Gasflusses, wie er während des dreiwöchigen Experiments aufgezeichnet wurde, ist in Abbildung 5.4 zu sehen. Aus der Summe der Einzelflüsse wurde der Gesamtfluß berechnet. Die mit den ADC gemessenen, durchschnittlichen Gasflüsse und ihre Schwankungen faßt Tabelle 5.4 zusammen.

Mit Ausnahme der Regelschwingungen haben sich die aufgezeichneten Spannungen und damit die produzierten Gasflüsse während des dreiwöchigen Experiments nicht geändert. Daher stellt die Differenz der vor und nach der Strahlzeit gemessenen Gasflüsse eine obere Grenze für die Schwankungen der Gaszusammensetzung dar. Mit diesen Werten und Tabelle 3.1 können die Auswirkungen auf Driftgeschwindigkeit und Gasverstärkung abgeschätzt werden. Daraus ergibt sich eine von der Gasmischung verursachte Änderung

Gaskomponente	Gasfluß	Schwankung
Argon	1993.5 <i>ml/min</i>	$\pm 2$ <i>ml/min</i>
Isobutan	240.5 <i>ml/min</i>	$\pm 1$ <i>ml/min</i>
Methan	61.5 <i>ml/min</i>	$\pm 1$ <i>ml/min</i>
Argon durch Wasser	321 <i>ml/min</i>	$\pm 2$ <i>ml/min</i>
Gesamte Gasmenge	2641 <i>ml/min</i>	$\pm 4$ <i>ml/min</i>

Tabelle 5.4: Mittlere Gasflüsse über den Verlauf des Experiments und die maximalen dabei aufgetretenen Schwankungen, die von Regelschwingungen verursacht wurden.

der Driftgeschwindigkeit von weniger als 0,15 % und eine Änderung der Gasverstärkung von weniger als 1,4 %.

Der Argonfluß durch das Wasser konnte erst im Laufe des ersten Tages mit aufgezeichnet werden. Vorher lieferte der ADC einen negativen Wert, was sich auch in der Summe der Flüsse für diese Zeit zeigt. Die an den Kurven sichtbaren Schwankungen wurden von den Regelschwingungen der BROOKS-Mass-Flow-Controller und der Auflösung bei der Aufzeichnung verursacht. Zum Wechseln von Gasflaschen wurde die Gasproduktion viermal unterbrochen, was sich als Absinken der Werte bemerkbar macht. Durch die Umrechnung der gemessenen Spannungen geht die bestimmte Nullpunktverschiebung mit ein. Dies erklärt die angezeigten, endlichen Gasflüsse bei unterbrochener Gasproduktion und nach dem Ende des Experiments.

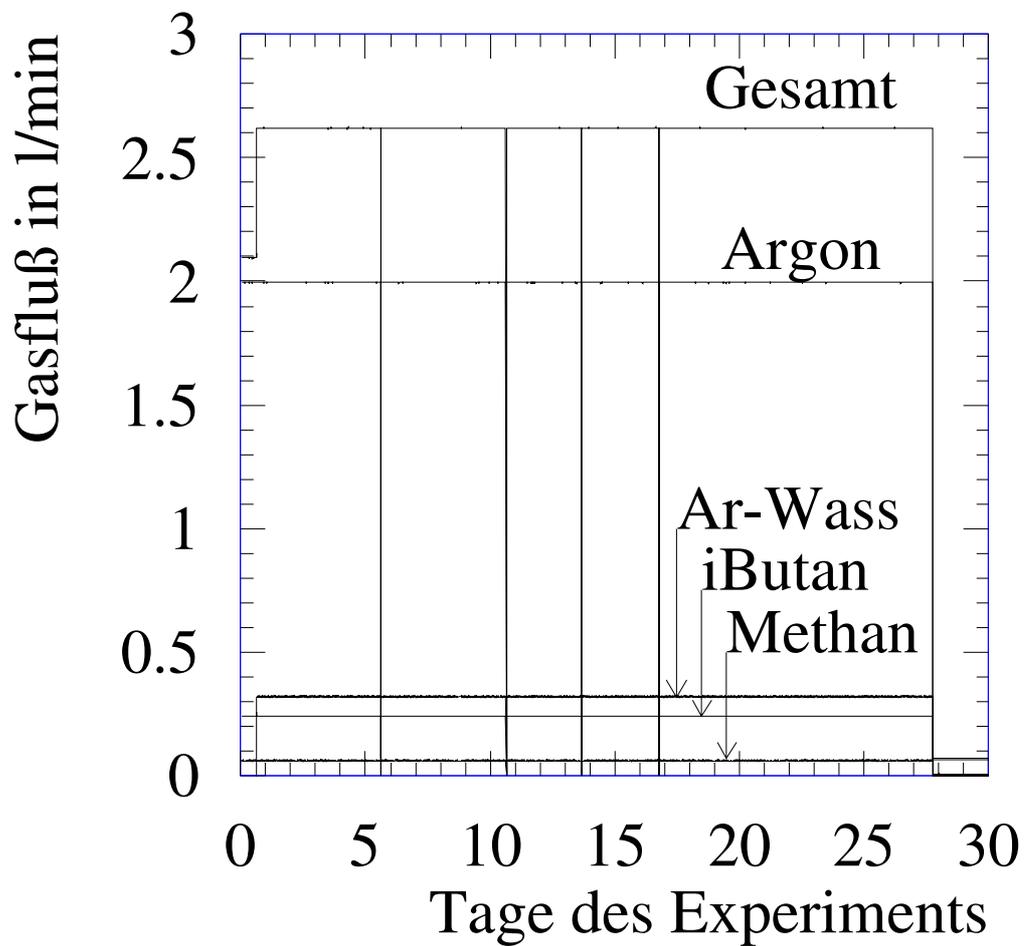


Abbildung 5.4: Die Grafik zeigt den Verlauf des Gasflusses für die verschiedenen Komponenten des Gasgemischs und den durch Addition der Einzelflüsse gewonnenen Gesamtfluß, welche über die Istwerte der BROOKS Mass-Flow-Controller bestimmt wurden. Die durch das Wasser fließende Argonmenge konnte erst im Laufe des 1. Tages mit zur Messung hinzu genommen werden; davor wurden negative Werte aufgezeichnet.

## 5.4 Verteilung des Gasgemischs

Die Qualität des Gases in den Driftkammern hängt unter anderem vom Anteil an zugeführtem Frischgas ab. Durch Gasverstärkung und Entladungen in den Kammern wird das Gasgemisch verbraucht, Ausgasungen von Kunststoffen und eindiffundierender Sauerstoff verändern die Eigenschaften des Gases. Um eine gleichbleibende Qualität zu erhalten, sollte daher der Gasfluß in die Driftkammern möglichst konstant sein. Eine Kontrolle ist besonders wichtig, da beide Driftkammern vom selben Gassystem versorgt werden, und sich das Gas in Abhängigkeit der Druck- und Strömungsverhältnisse auf die Driftkammern verteilt. Durch geeignetes Einstellen der Flußwiderstände der Abgasleitungen wurde eine annähernd gleiche Aufteilung des Gasgemischs auf die Driftkammern erzielt. Dies verursacht beim Helitron, da es ein geringeres Volumen als die CDC besitzt, einen höheren Volumenaustausch. Damit kann die Verschlechterung der Gasqualität aufgrund der großen, mit Folie bespannten Flächen des Helitrons kompensiert werden.

Zur Messung der Gasverteilung sind in der Gaszuführung jeder Driftkammer ein McMillan Flußmeter des Typs 100-7 mit einem Meßbereich von 400-2000 *ml/min* angebracht. Diese Flußmeter messen den Gasfluß mechanisch mit einer sich im Gasstrom drehenden Turbine, deren Drehzahl optisch gemessen und elektronisch in eine Spannung umgewandelt wird. Aufgrund von Reibung wird ein minimaler Gasfluß zum Anlaufen benötigt, der bei etwa 20 % des maximalen Meßwerts liegt. Wegen der Trägheit der Turbine und der Zeitkonstante des Frequenz - Spannungswandlers wird erst nach etwa 30 Sekunden der tatsächliche Wert angezeigt. Bei stehender Turbine liefert der Sensor eine Spannung von ungefähr 20 *mV*. Vor dem Einbau wurde mit Stickstoff ihre Ausgangsspannung in Abhängigkeit zum Gasfluß gemessen. Der Spannungsverlauf ist nach dem Anlaufen der Turbine in erster Näherung linear, zeigt jedoch eine leichte Krümmung, die zu einer Abweichung von bis zu 3 % des Meßwerts führt. Sensoren gleichen Typs unterscheiden sich dabei in Steigung, Krümmung und minimal meßbarem Fluß.

Da das Meßprinzip der McMillan Flußmeter von Einbaulage und auch der Gasart abhängig ist, wurden nach dem Einbau noch einmal Meßwerte mit dem FOPI-Gasgemisch für die Flußmeter bestimmt. Der Gasfluß  $F$  ergibt sich aus der Spannung  $U$  nach folgender Formel:

$$F[\text{ml/min}] = N + S \cdot U[\text{V}]$$

Die Werte finden sich Tabelle 5.5. Aufgrund geringer Unwucht und der Zeit-

	CDC	Helitron
$N$	$59\text{ ml}$	$-85\text{ ml}$
$S$	$421,8\text{ (ml/min)/V}$	$424,7\text{ (ml/min)/V}$

Tabelle 5.5: Die Anpassung einer linearen Funktion an die von den McMillan Flußmetern der beiden Driftkammern gelieferte Spannung im Bereich von 400-2000  $\text{ml/min}$  lieferte die Nullpunktverschiebung  $N$  und Steigung  $S$ .

konstante für die Frequenz-Spannungswandlung, schwanken die von den Flußmetern gelieferten Spannungen um etwa 1 % des Meßwerts.

Abbildung 5.5 zeigt in einem Bild den aus der Messung an den BROOKS Mass-Flow-Controllern bestimmten Gesamtfluß, die mit den McMillan Flußmetern bestimmten Gasflüsse zu den einzelnen Driftkammern sowie die daraus digital berechnete Summe.

Wie schon in Abschnitt 5.3 beschrieben, konnten erst im Laufe des ersten Tages alle 4 Gasflüsse bei der Gemischbildung aufgezeichnet werden. Ab diesem Zeitpunkt wurde auch ein Teil der Gasmischung durch den Driftgeschwindigkeitsmonitor PHIDOO und einen Proportionalzähler geleitet. Die Differenz zwischen der mit den BROOKS Mass-Flow-Controllern produzierten Gasmenge und der Summe des Gasflusses durch die Kammern ist die durch die Testzähler fließende Gasmenge. Die Unsicherheit beider Meßmethoden ist am Vergleich der Summe der Gasflüsse vor dem Anschließen der Testzähler mit der danach produzierten Gasmenge zu sehen. Die Differenz liegt bei weniger als  $0,05\text{ l/min}$ . Da bei Abschaltung des Gassystems, um ein Eindringen von Luftsauerstoff zu vermeiden, das Ventil zu den Testzählern geschlossen wurde, stieg auch hier der Gasfluß durch die Kammern an. Der zeitliche Verlauf des Gasflusses ist mit dem Differenzdruck der Driftkammern und den verschiedenen Flußwiderständen in den Gasleitungen verbunden und wird im Abschnitt 6.3.2 diskutiert.

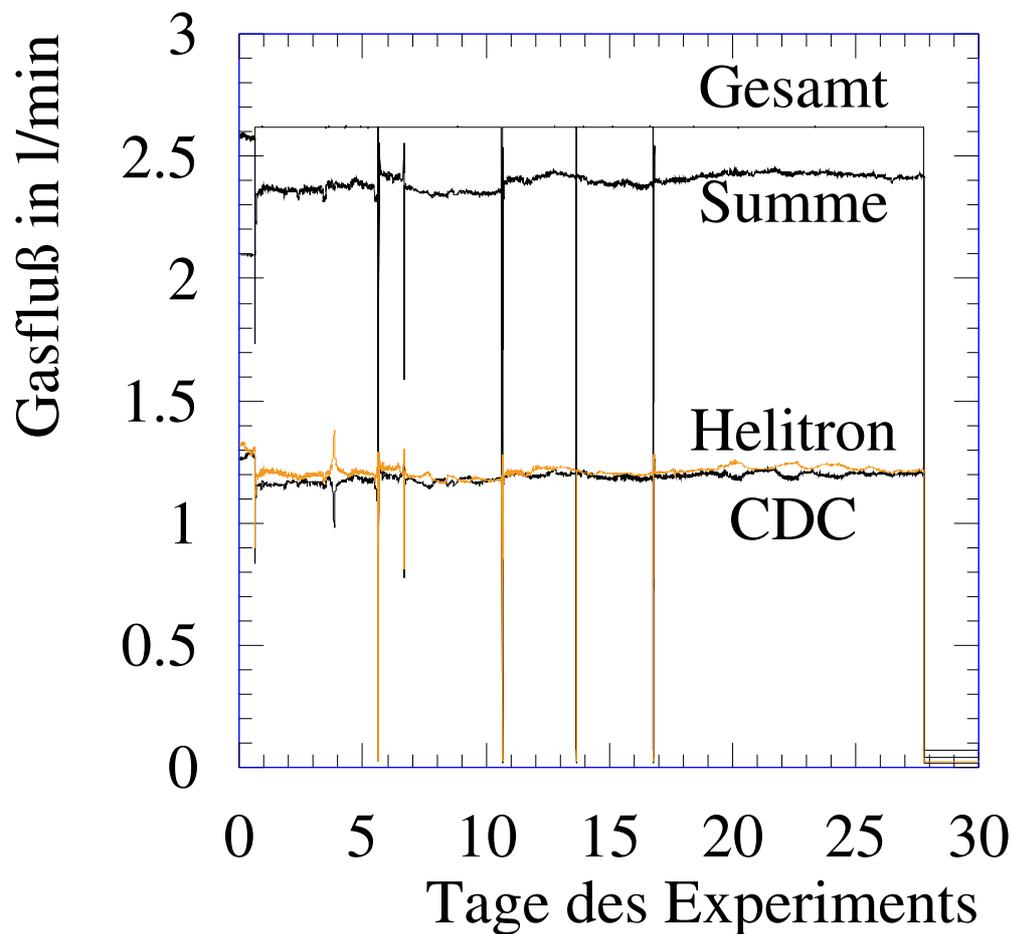


Abbildung 5.5: Die Abbildung zeigt den produzierten Gesamtfluß, der wie in Abbildung 5.4 aus der Summe des einzelnen Komponenten gebildet wurde, die separat gemessenen Flüsse durch die Driftkammern und die aus diesen digital gebildete Summe. Nach dem ersten Tag wurden während einer kurzen Unterbrechung ein Proportionalzähler und der PHIDOO angeschlossen. Die Differenz zwischen der produzierten Gasmenge und den Gasfluß durch die Driftkammern ist das durch diese Zähler geflossene Gas.

## 5.5 Der Sauerstoffgehalt im Abgas

Sauerstoff im Kammergas begünstigt die Rekombination von Ladungsträgern, was die Zahl der Driftelektronen reduziert. Dadurch ergibt sich ein zu niedriges Energieverlustsignal mit negativen Folgen für die Auflösung und die Nachweiswahrscheinlichkeit. Wasserdampf verstärkt die Wirkung des Sauerstoffs. Für eine 90:10 Argon-Methan-Mischung und einem Sauerstoffgehalt von 200 *ppm* wird in [Huk88] eine Verdoppelung der Elektronenabsorption durch 950 *ppm* Wasser beschrieben. Daher sollte, insbesondere bei dem verwendeten Gasgemisch, der Sauerstoffgehalt im Kammergas niedrig liegen.

Der Sauerstoff im Kammergas ist, da die einzelnen Komponenten des Gasgemischs nur Spuren von Sauerstoff enthalten, aus der Umgebungsluft durch kleinste, unvermeidbare Undichtigkeiten in Gassystem und Driftkammern eindiffundiert.

Zur Messung des Sauerstoffgehalts steht ein Sauerstoffanalysator Delta F Typ A plus von Panametrics [Pan87] zur Verfügung. Dieses Gerät bestimmt den Sauerstoffgehalt durch Messung der Leitfähigkeit eines vom Testgas durchströmten Elektrolyten. Bei Inbetriebnahme des Meßgeräts ist der Elektrolyt mit Luftsauerstoff gesättigt und es dauert einige Zeit, bis der korrekte Wert angezeigt wird. Da der Druck in den Driftkammern nur geringfügig über dem atmosphärischen Luftdruck liegt, muß das Gas mit einer Pumpe durch das Meßgerät gesaugt werden. Das Meßgerät besitzt 3 Meßbereiche (50, 500 und 5000 *ppm*) und setzt den Anzeigewert auch in eine Spannung zwischen 0 und 10 Volt um, die digitalisiert und aufgezeichnet wurde. Auf Abbildung 5.6 sind die während des Experiments aufgezeichneten Werte zu sehen. Zu Beginn wurden nur kurze Messungen an den Abgasleitungen der Kammern vorgenommen. Ab dem zehnten Tag wurde der Sauerstoffgehalt im Abgas der CDC kontinuierlich gemessen, ab dem neunzehnten Tag wurde das Gerät an die Abgasleitung des Helitrons angeschlossen.

Beide Kammern erreichten Werte zwischen 10 und 15 *ppm*, was bedeutend besser ist, als früher beobachtete Werte, die nie unter 50 *ppm* lagen. Dies wird auf die oben beschriebenen allgemeinen Verbesserungen im Gassystem zurückgeführt.

Der Meßwert zeigt periodische Schwankungen im Tagesverlauf mit einem Minimum gegen 8 Uhr morgens und einem Maximum gegen 18 Uhr abends. Da Aufgrund der Trägheit des Systems eine so rasche Änderung unwahrscheinlich erscheint, werden sie auf die Beeinflussung des Meßgeräts

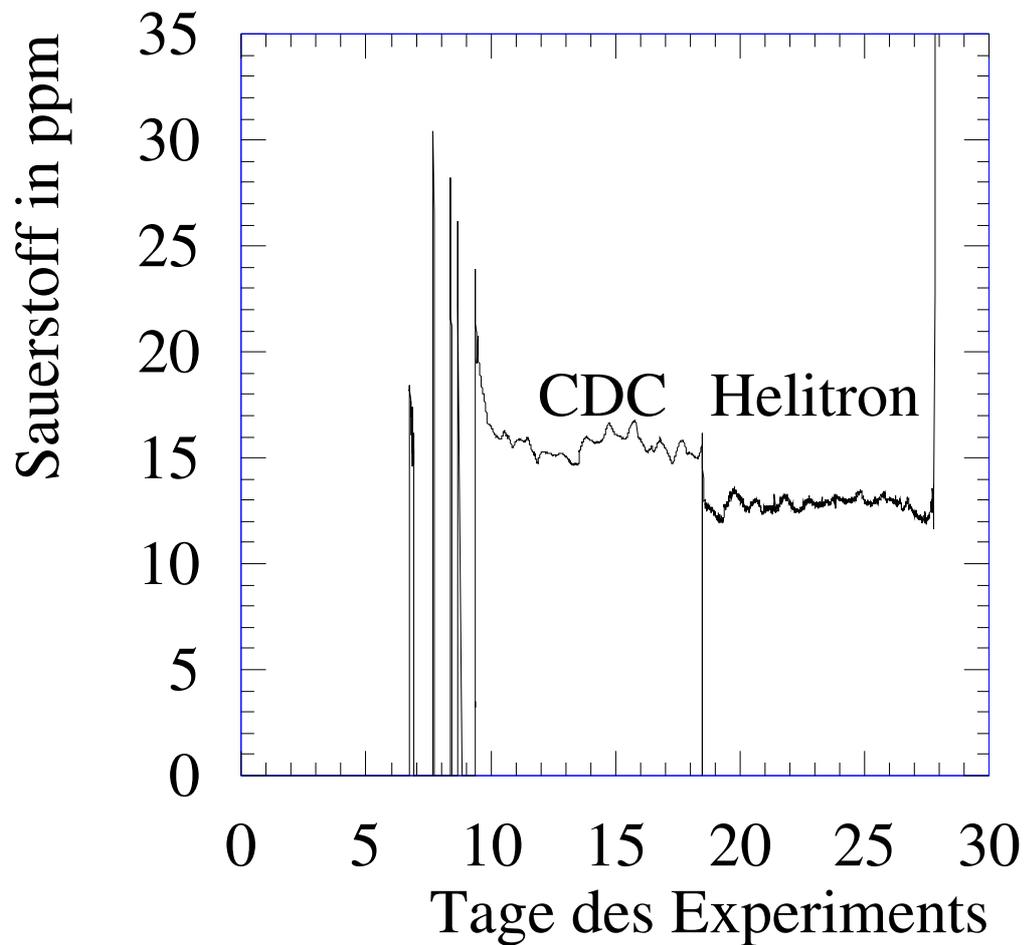


Abbildung 5.6: Die Abbildung zeigt den den zwischen dem zehnten und dem neunzehnten Tag den im Abgas der CDC und danach den im Abgas des Helitrons gemessenen Sauerstoffgehalt. Die Schwankungen werden von der Raumtemperatur verursacht.

durch Schwankungen der Raumtemperatur zurückgeführt. Mit der durch Sonnenauf- und Untergang verursachten periodischen Erwärmung der Umgebung, die sich zeitverzögert auch auf die Temperatur in der Experimentierhalle auswirkt, kann der Verlauf erklärt werden.

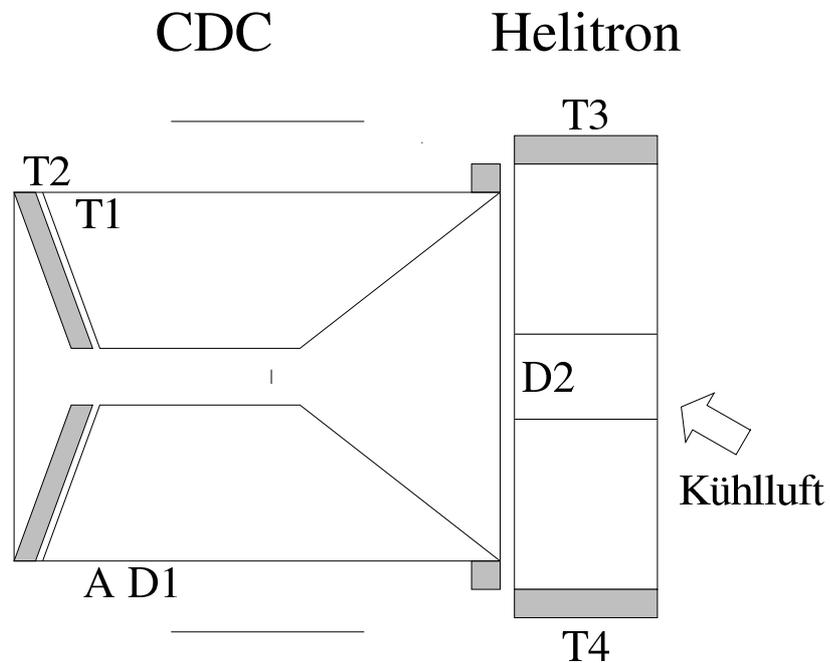


# Kapitel 6

## Temperatur, Druck und Magnetfeld

### 6.1 Installation der Sensoren

Die Parameter Temperatur und Druck beeinflussen wie in Kapitel 3 gesehen, über die Gasdichte, die zur Teilchenidentifizierung wichtigen Größen Energieverlust, Driftgeschwindigkeit und Gasverstärkung. Da die Temperatur auch zusätzlich den Arbeitspunkt von elektronischen Schaltungen, wie den Verstärkern, verändert, ist es wichtig Temperatur und Druck der Driftkammern zu kennen. Dazu wurden an den Driftkammern, wie in Bild 6.1 zu sehen verschiedene Sensoren installiert. Damit wurde es möglich, den Gasdruck in der CDC und die Temperatur an verschiedenen Stellen in und an den Driftkammern zu messen.



- |                               |                             |
|-------------------------------|-----------------------------|
| T1: Gastemperatur CDC         | A: Absolutdruck             |
| T2: Temperatur CDC oben       | D1: Differenzdruck CDC      |
| T3: Temperatur Helitron oben  | D2: Differenzdruck Helitron |
| T4: Temperatur Helitron unten |                             |

Abbildung 6.1: Die Zeichnung zeigt die Einbauorte der Temperatur- und Drucksensoren an den Driftkammern. Zwei Temperatursensoren wurden auf der Oberseite der CDC installiert. Einer davon mißt die Gastemperatur im Innern der Kammer. Am Helitron ist je ein Temperatursensor oben und unten zwischen den durch graue Flächen gekennzeichneten Vorverstärkern angebracht. Die Drucksensoren für Absolut- und Differenzdruck befinden sich an der Unterseite der CDC, der Differenzdrucksensor des Helitron wurde an dessen Vorderseite am äußeren Rand ungefähr auf Höhe des Targets befestigt.

## 6.2 Temperatur

Die Vorverstärker der Driftkammern befinden sich so nahe wie möglich an den Auslesedrähten, wodurch lange Verbindungen, die Einstreuungen und Rauschen verursachen, vermieden werden. Dies bedingt andererseits, daß die Verlustleistung der Vorverstärker in den Innenraums des Magneten abgegeben wird und dort zu einer Erwärmung führt. Temperaturänderungen beeinflussen einerseits über die Dichte des Gases Driftgeschwindigkeit und Gasverstärkung in den Driftkammern. Andererseits wirkt sich die Temperatur auch auf den Arbeitspunkt von Halbleitern, wie etwa den Vorverstärkern aus, was ebenfalls das Ausgangssignal ändert. Thermische Ausdehnung kann zu schlechten Kontakten führen und zu hohe Temperaturen vermindern die Lebensdauer von elektronischen Bauelementen. Insbesondere beim Helitron, das mit seinen Vorverstärkern fast den ganzen Querschnitt ausfüllt, kam es aufgrund hoher Temperatur häufig zu Ausfällen der Vorverstärker.

Um die Temperatur zu senken und zu stabilisieren, wurde eine Luftkühlung für den Innenraum des Magnets installiert. Diese bläst etwa auf Höhe des Targets an einer Seite des Helitrons gekühlte Luft in den Raum um die Driftkammern.

Um die Temperaturverhältnisse im Innenraum des Magneten zu erfassen, wurden insgesamt vier Temperatursensoren an den Driftkammern angebracht. Am Helitron werden ohne Kühlung die höchsten Temperaturen erwartet. Um die Temperaturdifferenz über dessen Höhe messen zu können, wurde je ein Temperatursensor seiner Ober- und Unterseite angebracht. Damit läßt sich auch die Auswirkung der Kühlluft messen. Die beiden anderen Temperatursensoren sind benachbart auf der Oberseite der CDC angebracht. Einer davon befindet sich im Innenraum der Kammer und mißt die Temperatur des Gases.

Zur Messung der Temperatur wurden Halbleiter-Temperatursensoren des Typs LM35 verwendet. Diese Temperatursensoren nutzen die Temperaturabhängigkeit der Durchlaßspannung eines PN-Übergangs in einem Halbleiter. Durch den eingebauten Verstärker liefern sie ein so großes Signal, daß andere temperaturabhängige Effekte, wie die an den Kontaktflächen unterschiedlicher Metallen auftretenden Thermospannungen, oder Rauschen vernachlässigt werden kann. Der Temperatursensor liefert bei Betriebsspannungen zwischen 5 und 30 V eine der Temperatur proportionale Spannung von 10 mV pro °C. Der Hersteller gibt eine Ausgangsspannung von 250 mV

bei  $25^{\circ}\text{C} \pm 0,4^{\circ}\text{C}$  an. Durch Messung der Spannung bei zwei Temperaturen, einmal in einem Kühlgerät bei  $10^{\circ}\text{C}$  und bei Raumtemperatur wurden vier LM35 ausgewählt, die weniger als  $0,2^{\circ}\text{C}$  Abweichung zeigten. Diese Genauigkeit ist bei weitem ausreichend für den hier geforderten Anspruch, die Temperaturverläufe während eines Experiments aufzuzeichnen. Als Referenz dienten ein Alkoholthermometer und ein elektrisches Thermometer mit jeweils einer Auflösung von  $0,1^{\circ}\text{C}$ .

Ein Nachteil von aktiven Bauelementen ist ihre Neigung zur Erzeugung von Schwingungen. Da die Vorverstärker der Driftkammern auf Einstreuungen sehr empfindlich sind, muß auf eine gute Unterdrückung von Hochfrequenzschwingungen geachtet werden. Bei der Untersuchung zeigte sich, daß bei etwa  $20^{\circ}\text{C}$  die Ausgangsspannung mit  $30\text{ kHz}$  zwischen  $100$  und  $300\text{ mV}$  schwankt. Mit einem direkt an dem LM35 angelöteten  $1\ \mu\text{F}$ -SMD-Kondensator konnten diese Schwingungen unterdrückt werden.

Der Temperaturverlauf während des Experiments an allen eingebauten Sensoren ist in Abbildung 6.2 zu sehen.

Zu Beginn des Experiments mußte noch eine geeignete Einstellung für das neu installierte Kühlgerät gefunden werden, welche einerseits eine ausreichende Kühlleistung lieferte, andererseits nicht durch zu starkes Abkühlen zu Kondenswasserbildung führt. Nach etwa vier Tagen war ein geeigneter Wert gefunden, und die Temperatur stabilisierte sich. Die Schwankungen in der Kühlung beeinflussen besonders stark die Temperatur auf der Oberseite des Helitrons, während die an seiner Unterseite und an der CDC gemessenen Werte gar keine bis geringe Schwankungen zeigen. Da die gekühlte Luft am Helitron eingeblasen wird, ist die Lufttemperatur an der CDC höher, die höchste Temperatur wird dabei im Gas der CDC gemessen. Dies liegt daran, daß der direkt daneben angebrachte Sensor, der die Temperatur außerhalb der CDC mißt, durch die Luftströmung besser gekühlt wird, während in der Driftkammer selbst nur geringe Konvektion herrscht. Nach der Stabilisation schwanken die Temperaturen der Driftkammern um weniger als  $\pm 0,5^{\circ}\text{C}$  und es stellt sich eine Temperaturdifferenz von etwa einem Grad über die Höhe des Helitrons ein. Mit den Werten für die Dichteschwankungen aus Tabelle 3.1 ergibt sich für eine Temperaturänderung von  $1^{\circ}\text{C}$  eine Änderung der Driftgeschwindigkeit um  $0,06\%$  und der Gasverstärkung um  $3,0\%$ . Nachdem nach Beendigung des Experiments die Vorverstärker abgeschaltet wurden, während die Kühlung noch einige Zeit weiterlief, sanken die Temperaturen sogar unter Raumtemperatur, wobei das Helitron aufgrund seiner Position

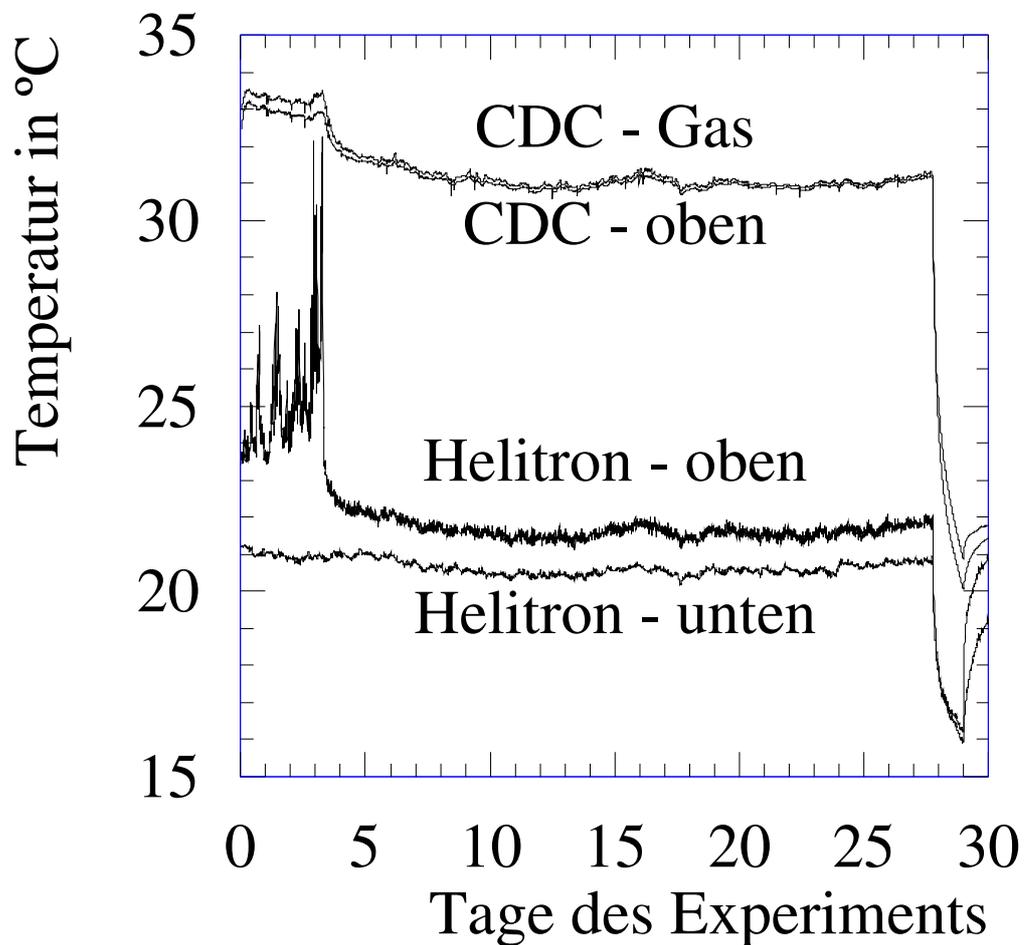


Abbildung 6.2: Die Abbildung zeigt den während des Experiments gemessenen Temperaturverlauf. Da erst noch eine Einstellung für das Kühlgerät gefunden werden mußte, schwanken die Werte zu Beginn. Dies wirkt sich am stärksten auf Oberseiten der Driftkammern aus. Nach Abschalten der Vorverstärker nach dem Ende des Experiments sinken die Temperaturen und laufen nach Abschalten der Kühlung auf den Wert der Umgebungstemperatur zusammen.

stärker als die CDC abgekühlt wurde. Nach Abschalten der Kühlung laufen alle vier Werte auf den Wert der Raumtemperatur zusammen.

## 6.3 Druck

Der Leichtbau der Driftkammern, der Streuung von durchgehenden Teilchen gering hält, erlaubt nur sehr geringe Druckdifferenzen zur Umgebung. Der Gasdruck in den Kammern setzt sich aus dem atmosphärischen Luftdruck und dem geringen Differenzdruck zusammen, wobei sich letzterer sich im Fließgleichgewicht zwischen ein- und ausströmendem Gas einstellt. Die von der Wetterlage verursachten Schwankungen des Luftdrucks verändern Driftgeschwindigkeit und Gasverstärkung. Um dies bei der Datenanalyse korrigieren zu können, muß der Druckverlauf aufgezeichnet werden.

Da der Differenzdruck nur einen Bruchteil des Luftdrucks ausmacht, hat er nur geringen Einfluß auf die Signale der Driftkammern. Ein zu hoher Differenzdruck kann jedoch die Driftkammer verformen und beschädigen. Weiterhin hat er Einfluß auf die Gasverteilung zwischen den Driftkammern.

### Prinzip der Druckmessung

Die verwendeten Halbleiterdrucksensoren messen mit einer Brückenschaltung die Widerstandsänderung einer vom Druck verformten piezoresistiven Membran [Tie89]. Drucksensoren zur Absolutdruckmessung besitzen eine eingebaute Vakuumkammer und bestimmen damit die Druckdifferenz. Der zur Messung des Differenzdrucks verwendete Sensor des Typs 160PC von Micro Switch besitzt einen eingebauten Verstärker und liefert  $0,2 V$  pro  $hPa$ . Der verwendete Absolutdrucksensor des Typs 130PC des gleichen Herstellers liefert eine Ausgangsspannung von  $100 \mu V$  pro  $hPa$  und benötigt aufgrund der geringen Spannung einen externen Verstärker.

#### 6.3.1 Messung des Absolutdrucks

Zur Messung des Absolutdrucks wurde eine Platine mit eingebautem P130-Drucksensor verwendet, wie sie auch in Drahtkammern für das Medizinprojekt der GSI eingebaut werden. Der Drucksensor ist zum Messen von Absolutdrücken zwischen  $0$  und  $1033 hPa$  ausgelegt. Die Platine benötigt eine symmetrische Betriebsspannung von  $\pm 8 V$ , und liefert eine symmetrische Ausgangsspannung. Diese liegt bei Atmosphärendruck bei etwa  $2,7 V$ . Um den Drucksensor zu eichen, wurde eine genaue Referenz für den Absolutdruck benötigt. Dazu wurde ein mechanisches Manometer mit einem

Meßbereich 0-1520 *Torr* und einer Ablesegenauigkeit von 0,2 *Torr* geeicht. Mit einem Quecksilberbarometer wurde der Luftdruck auf 0,1 *Torr* genau bestimmt und mit dem vom Manometer angezeigten Wert verglichen. Das Manometer zeigte dabei 6,5 *Torr* zuviel an. Da auch nach längerem Evakuieren mit einer Vakuumpumpe 6,5 *Torr* absolut angezeigt wurde, wurde dieser Wert als Offset angenommen.

Mit einer Wassersäule von 30 *cm* Höhe wurde im Detektorlabor der GSI die Ausgangsspannung der Platine bei verschiedenen Überdrücken gemessen. Mit diesen Werten wurde die konstante Abweichung und Steigung der von der Platine gelieferten Spannung im Bereich des Umgebungsdrucks bestimmt wurde. Der Absolutdruck  $p$  ergibt sich damit aus der Ausgangsspannung  $U$  nach folgender Formel:

$$p = (538,4 \pm 3,6) \text{ hPa} + (175,88 \pm 1,3) \text{ hPa/V} \cdot U[\text{Volt}]$$

Die Platine wurde zur Abschirmung in ein Aluminiumgehäuse eingebaut und zusammen mit einem Differenzdrucksensor P160 an der Unterseite der CDC befestigt. Mit der oben angegebenen Umrechnung wurde der Gasdruck in der Kammer bestimmt und während des Experiments aufgezeichnet. Da der Differenzdruck im Vergleich zum Absolutdruck sehr klein ist, entspricht der Meßwert praktisch dem atmosphärischen Luftdruck und gilt deshalb auch für das Helitron. Der gemessenen Luftdruckverlauf ist in Abbildung 6.3 zu sehen.

Die Werte des Gasdrucks zeigen kleine Schwankungen im Tagesverlauf und starke Änderungen, die sich über mehrere Tage hinziehen. Erstere sind Auswirkungen von Tag und Nacht auf den Luftdruck; Letztere werden von der aktuellen Wetterlage verursacht. Die vom Wetter bedingten Druckschwankungen von bis zu 21 *hPa* verursachen Veränderung von 0,4 % bei der Driftgeschwindigkeit und 18,8 % bei der Gasverstärkung, was eine Korrektur bei der Datenanalyse erforderlich macht. Durch die kontinuierliche Aufzeichnung des Drucks zusammen mit der Experimentdaten ist dies jetzt möglich geworden.

### **Beeinflussung des Drucksensors durch die Temperatur**

Der steile Anstieg des „Absolutdrucks“ am achtundzwanzigsten Tag fällt zeitlich mit dem Absinken der Temperatur nach Abschalten der Vorverstärker zusammen. Daran zeigt sich, daß die Druckmessung von der Temperatur beeinflusst wird. Die an der Unterseite des Helitrons gemessene Temperatur,

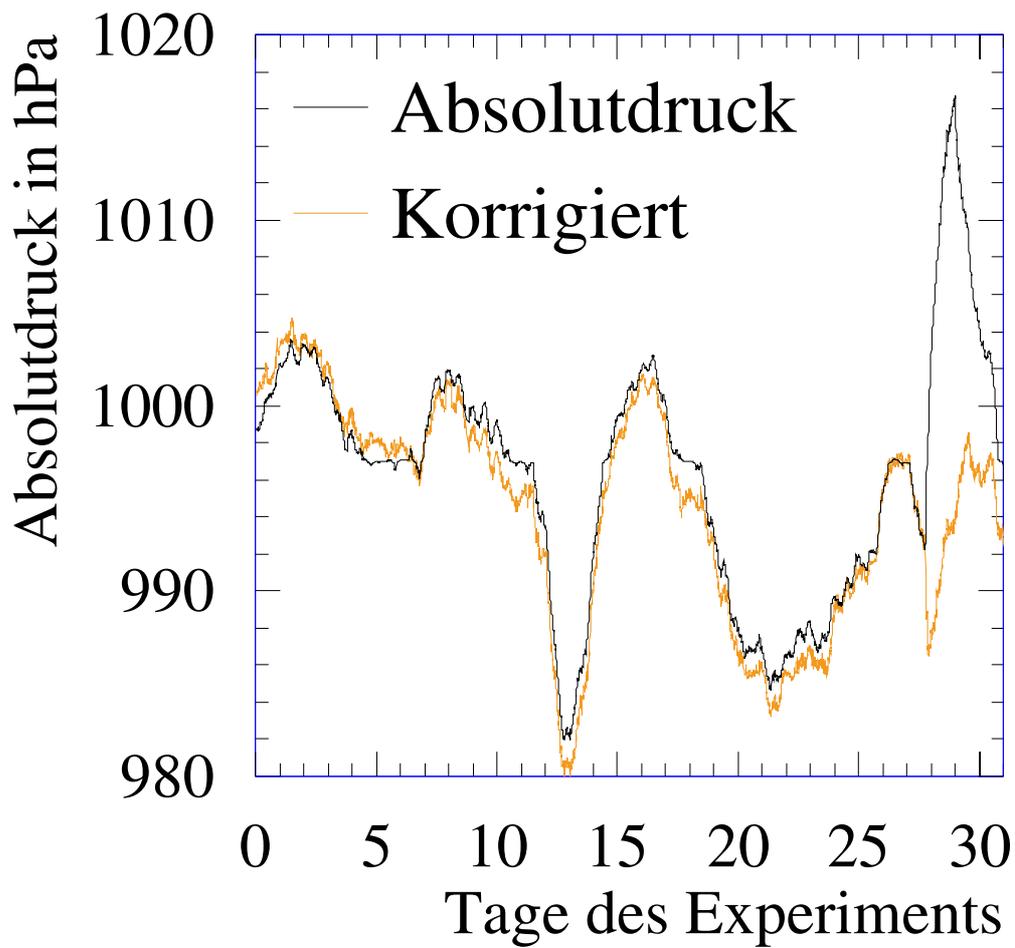


Abbildung 6.3: Die Abbildung zeigt den Verlauf des Absolutdrucks der CDC während des FOPI-Experiments. Aufgrund seiner Temperaturabhängigkeit wurde der Meßwert mit der an der Unterseite des Helitrons gemessenen Temperatur korrigiert.

stellt die beste Näherung für die Temperatur am Drucksensor dar und kann zur Abschätzung der Temperaturabhängigkeit des Drucksignals dienen. Mit dem Temperaturabfall um  $5^{\circ}C$  ging ein „Druckanstieg“ von  $24hPa$  einher. Daher wurde eine mit dieser Temperatur korrigierte Kurve in Abbildung 6.3 eingetragen. Da die Temperatur während des Experiments bis auf  $\pm 0,5^{\circ}C$  konstant waren, ändert sich hier der Verlauf um weniger als etwa  $2hPa$ .

### 6.3.2 Messung des Differenzdrucks

Der Differenzdruck wirkt sich nicht auf das Signal der Kammern aus, da er um Größenordnungen unter dem Luftdruck liegt. Da die Kammern jedoch nicht für größere Überdrücke gebaut sind und sie leicht mechanisch beschädigt werden können, ist die Kenntnis des Differenzdrucks wichtig. Zusätzlich beeinflusst der Differenzdruck die Gasverteilung. Zu seiner Messung werden Drucksensoren des Typs P160 mit eingebauten Verstärker verwendet. Mit der Wassersäule des GSI-Detektorlabors wurde ihre Linearität überprüft. Sie liefern ein lineares Ausgangssignal von  $2,121\text{ mV/Pa}$  bei einer sensorabhängigen Nullpunktverschiebung von etwa  $1\text{ V}$ . Die Betriebsspannung von  $8\text{ V}$  wird von einer Steuer- und Anzeigeeinheit Typ 86B1<sup>1</sup> geliefert. Diese besitzt einen Verstärker mit einstellbarer Nullpunktkorrektur und zeigt auf einer Digitalanzeige den mit dem angeschlossenen Differenzdrucksensor gemessenen Druck an. Der Ausgang des Verstärkers ist herausgeführt und die Spannung wurde digitalisiert. Da der Gasfluß der Driftkammern vom Differenzdruck beeinflusst wird, zeigt Abbildung 6.4 den Verlauf beider Größen für beide Driftkammern. Der Differenzdruck einer Kammer stellt sich im Fließgleichgewicht von ein- und ausströmender Gasmenge ein. Diese wiederum ist vom Flußwiderstand der Abgasleitung, der Füllung des zur Druckstabilisierung verwendeten, beschwerten Kissens und dem Differenzdruck der anderen Kammer abhängig. Bei längeren Unterbrechungen der Gasversorgung, wie sie beim Wechseln der Gasflaschen auftreten, sinkt der Differenzdruck der Kammern aufgrund des ausströmenden Gases ab. Das Helitron zeigt geringere Druckschwankungen als die CDC, da es aufgrund seiner großen, mit Folie bespannten Oberfläche bei Druckschwankungen nachgeben kann. Die sichtbaren Schwankungen wurden durch Veränderung des Widerstands der Abgasleitung verursacht. Insbesondere ab etwa dem zwanzigsten Tag sieht man, daß ein erhöhter Gasdruck in der CDC zu verringertem Gasfluß in CDC und erhöhtem Gasfluß im Helitron führt.

Vor dem Beginn des Experiments waren für beide Sensoren die Nullpunktabweichung korrigiert worden. Für das Helitron wurde auch nach Abschalten ein Überdruck angezeigt, was durch einen verschobenen Nullpunkt bei Drucksensor oder Verstärker verursacht wird.

---

<sup>1</sup>Eine Entwicklung der GSI, die zur druckabhängigen Steuerung von Ventilen oder Pumpen verwendet wird.

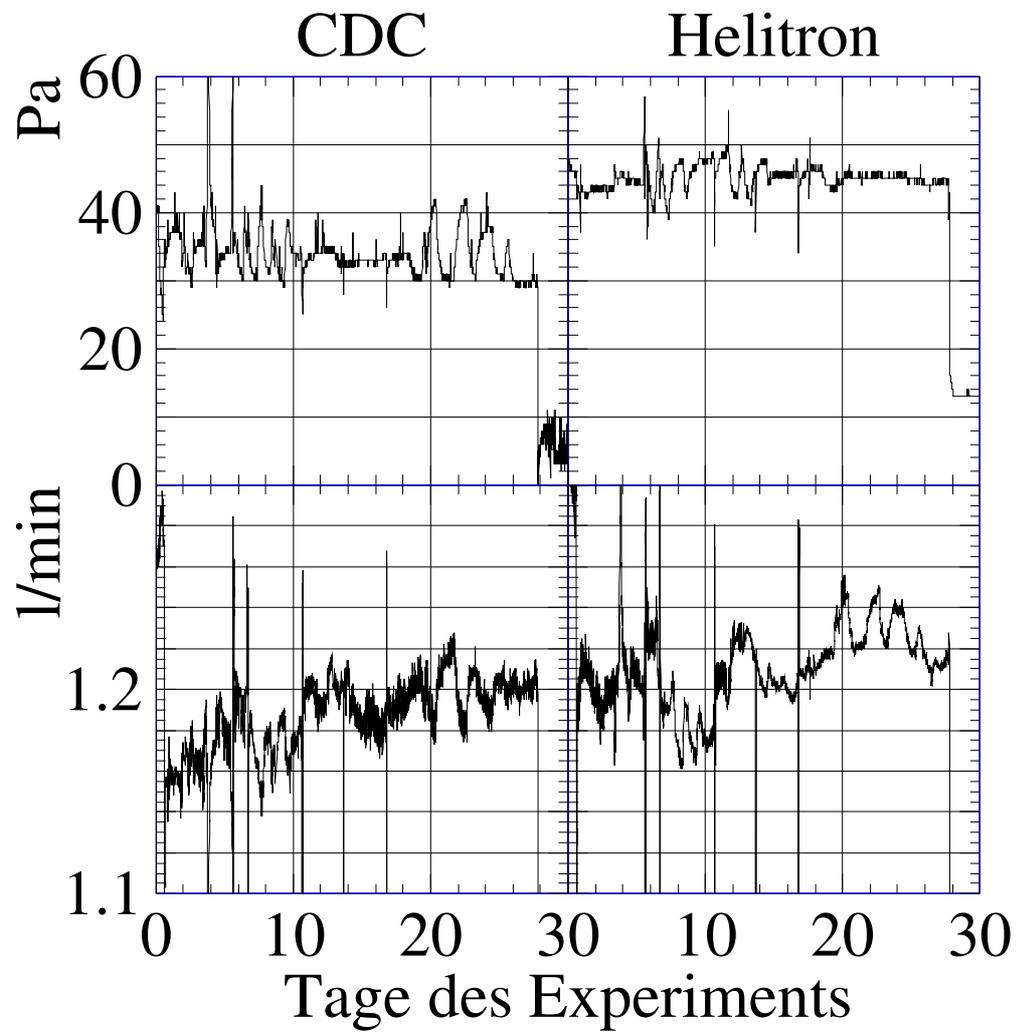


Abbildung 6.4: Verlauf von Differenzdruck (oben) und Gasfluß (unten) der beiden Driftkammern.

### 6.3.3 Untersuchung der Sensoren in einem Magnetfeld

Um die in den Driftkammern herrschenden Drücke und Temperaturen messen zu können, müssen die Sensoren im Magnetfeld funktionieren. Von den Differenzdrucksensoren P160, die die Druckdifferenz zwischen Kammergas und Außendruck messen, war bekannt, daß sie vom Magnetfeld beeinflusst werden, was auf den Hall-Effekt zurückzuführen ist. Daher wurde das Verhalten aller Sensoren vor dem Einbau in einem Modell eines Strahlführungsmagneten des SIS bei einem Magnetfeld von 0,2 Tesla getestet. Es zeigte sich, daß die Temperatursensoren und die Platine zur Absolutdruckmessung nicht vom Magnetfeld beeinflusst werden. Die Auswirkungen des Magnetfelds auf einen Differenzdrucksensor P160 ist in Tabelle und Zeichnung in Abbildung 6.5 zusammengefaßt. Die Nullpunktverschiebung von 0,994 V, gemessen ohne

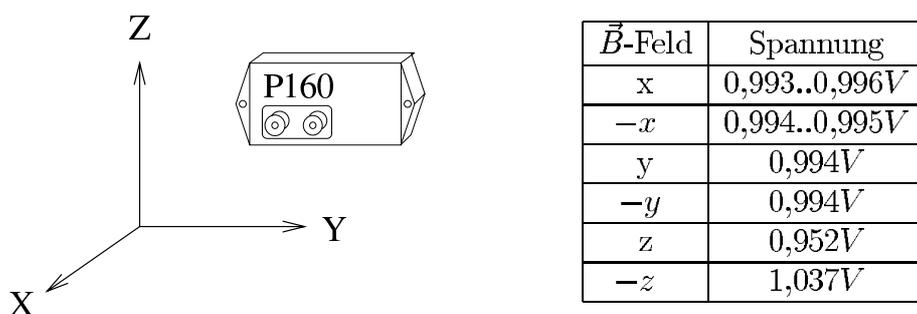


Abbildung 6.5: Das Bild zeigt die Zeichnung eines Differenzdrucksensors P160. Die Tabelle enthält die gemessenen Spannungen bei einem Magnetfeld von 0,2 T in den angegebenen Richtungen.

Magnetfeld, wird von einem Magnetfeld in y-Richtung nicht verändert. In z-Richtung ergibt sich dagegen eine Änderung: Unter der Annahme eines linearen Verlaufs erhalte man beim FOPI-Magneten bei 0,6 T eine Spannungsänderung von etwa 120 mV. Dies entspricht einer Druckänderung von 60 Pa und damit dem doppelten Betriebsdruck der Driftkammern. Durch Wahl der richtigen Einbaulage können die Sensoren im Magnetfeld aber ohne Beeinflussung benutzt werden; die Meßwerte während des FOPI-Experiments zeigen für den Zeitraum des zwölften Tages, an dem, wie in Abbildung 6.6 zu sehen, das Magnetfeld auf Null heruntergefahren wurde, keine signifikanten Änderungen.

## 6.4 Magnetfeld

Das Magnetfeld zur Impulsbestimmung wird von einem supraleitenden Magneten erzeugt. Da der Supraleiter einen, wenn auch geringen Widerstand besitzt, nimmt das Magnetfeld mit der Zeit langsam ab. Zur Messung der magnetischen Feldstärke sind am Magneten mehrere Hall-Sonden angebracht. Die Hall-Spannung von einer der Sonden, wurde während des Experiments aufgezeichnet. Da sie sich nahe am Eisenjoch des Magnets befindet, mißt sie ein um etwa 10 % höheres Feld, als in der CDC herrscht. Die aufgezeichneten Werte sind daher um diesen Faktor zu groß. Für die Bestimmung der Steigung und in Abbildung 6.6 wurde der Meßwert auf das in der CDC herrschende Feld umgerechnet. Abbildung 6.6 zeigt den Verlauf des natürlichen Abfalls des Magnetfelds.

Da dieser sehr gering ist, etwa  $-1.3 * 10^{-4}$  Tesla pro Tag, machen sich bei der Messung die Einflüsse von Einstreuungen und die Auflösung bei der Digitalisierung der Werte stark bemerkbar.

Am zwölften Tag wurde das Magnetfeld kurzzeitig abgeschaltet und danach wieder auf den nominellen Wert gebracht. Damit konnte die Position der einzelnen Unterdetektoren zueinander über die jetzt nicht mehr gekrümmten Spuren von Teilchen genau bestimmt werden.

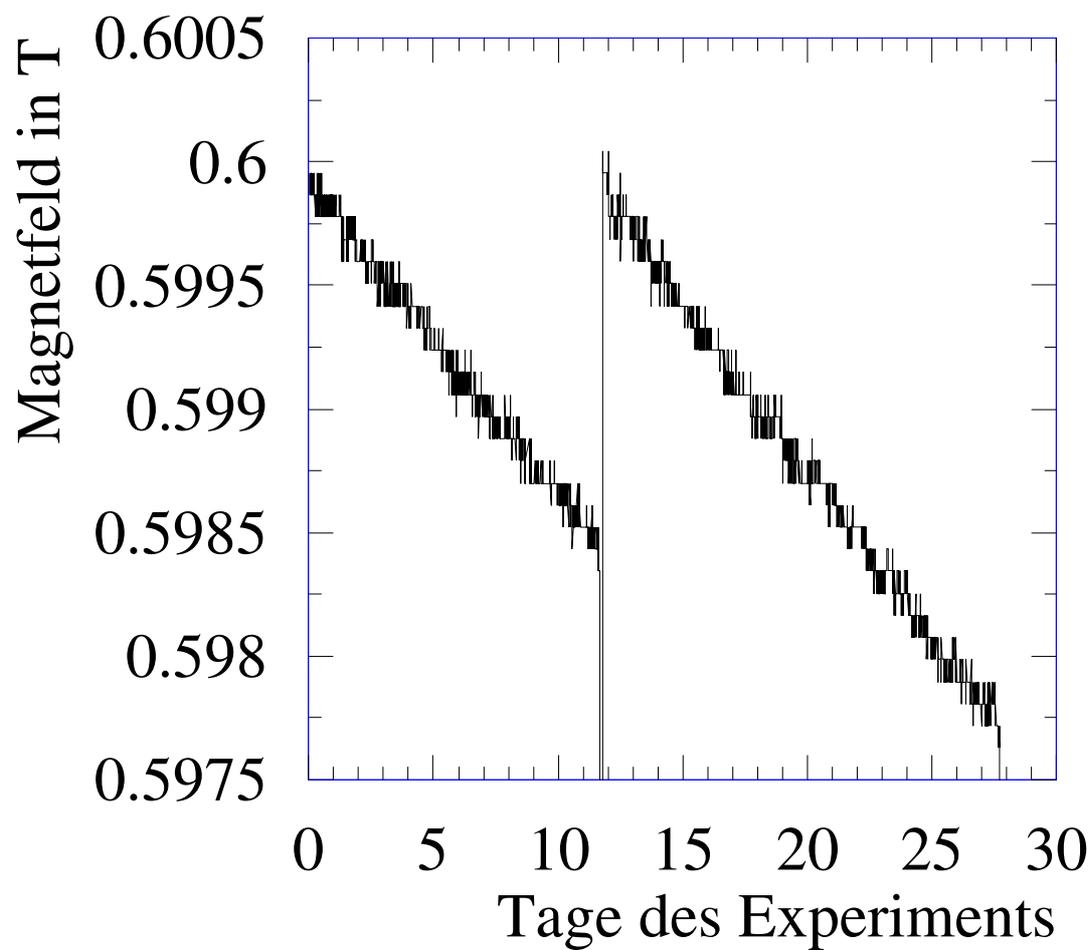


Abbildung 6.6: Normaler zeitlicher Abfall des Magnetfelds des supraleitenden Magneten. Nach 11 Tagen wurde das Feld für einige Stunden abgeschaltet, und danach wieder auf den Nominalwert gebracht.



# Kapitel 7

## Die Hochspannungsversorgung der Driftkammern

### 7.1 Alterungseffekte, Durchschläge und Dauerentladungen

Zur Erzeugung der elektrischen Felder in den Driftkammern werden Hochspannungen benötigt. Die Messung der dabei fließenden Ströme ermöglicht das Erkennen von instabilen Betriebszuständen, z.B. Entladungen in der Kammer. Dies ist insbesondere deshalb wichtig, da Entladungen das Altern der Driftkammern beschleunigen.

#### Alterungseffekte

Obwohl viele Untersuchungen zu diesem Thema durchgeführt wurden, sind die Prozesse, die zur Alterung von Driftkammern führen, noch immer nicht vollständig verstanden. Alterung führt bei Driftkammern zu verminderter Verstärkung und Auflösung und endet damit, daß die Betriebsspannungen nicht mehr erreicht werden können. Der Prozeß ist von Gaszusammensetzung, Verunreinigungen und der in der Kammer deponierten Ladung abhängig. Da die FOPI-Driftkammern mit einer hohen Gasverstärkung nahe am Durchschlagpunkt betrieben werden, kommen hier noch Hochspannungsdurchschläge als weiterer das Altern beschleunigender Faktor hinzu. Wie in [Kad91] beschrieben, stellt die Gasverstärkung am Auslesedraht eine Plasmaentladung

dar, in der Komponenten des Kammergases zersetzt und Radikale gebildet werden. Diese polymerisieren und können sich am Auslesedraht oder an anderen Orten der Driftkammer niederschlagen. Solche Ablagerungen waren, wie in Kapitel 4 beschrieben, an verschiedensten Stellen der CDC gefunden worden. Von diesen Ablagerungen können Dauerentladungen und Durchschläge verursacht werden, die wiederum das Altern der Kammer verstärken.

### **Durchschläge**

Die Durchschläge oder Hochspannungsentladungen entstehen an Orten mit erhöhter elektrischer Feldstärke. Ursachen dafür sind etwa eingebrachte Staubbpartikel, entlang der elektrischen Feldlinien polymerisierte organische Verbindungen, die den Abstand zwischen den Drähten vermindern, und Unebenheiten auf der Drahtoberfläche, wie sie von den bei den Durchschlägen auftretenden „sparks“ genannten Funken oder Sputterprozessen verursacht werden. Auch die Belastung der Driftkammer, die von durchgehenden Teilchen verursacht wird, wirkt sich auf Häufigkeit und Amplitude der Entladungen aus. Da die Entladungen das Gasgemisch stärker als die normale Gasverstärkung zersetzen und viele Photonen und freie Ladungsträger bilden, verstärken sie dadurch erheblich das Altern der Driftkammern. Um ein durch Entladungen verursachtes Altern der Kammern vermeiden zu können, müssen die Ursachen, die zu Entladungen führen, untersucht und beseitigt werden.

### **Dauerentladungen und Malter-Effekt**

Polymerisationsprodukte, die sich auf der Oberfläche eines Kathodendrahtes als dünne, nichtleitende Schicht niederschlagen, können durch den Malter-Effekt [Mal36] zu einer Feldemission von Elektronen führen. Durch den geringen Ladungsaustausch durch die Isolationsschicht sammeln sich positive Ionen auf der Isolationsschicht und erzeugen ein hohes elektrisches Feld, in dem durch Sekundärelektronen-Emission Elektronen die Kathode verlassen können, ohne die positiven Ionen zu neutralisieren. Die Elektronen erzeugen durch Gasverstärkung an der Anode neue Ionen, wodurch der Prozeß aufrecht erhalten wird oder sich sogar ausbreitet. Dies wird als Ursache von hohen Dauerströmen gesehen. Da die Durchschläge viele Ionen produzieren, können auch sie der Auslöser für eine Dauerentladung sein. Durch Erniedrigen der Potentialspannung und somit einer Reduzierung der Gasverstärkung

kann der Prozeß unterbrochen werden. Der Malter-Effekt wurde am Helitron, sowie am Testzähler PHIDOO wie in [Sto96] beschrieben, beobachtet. Bei dem Testzähler konnte ein Ansteigen des Ruhestroms um den Faktor 100 durch das Annähern einer starken Strahlungsquelle ausgelöst werden. Nach dem Entfernen der Quelle blieb der Strom auf diesem hohen Niveau und nach einer kurzzeitigen Reduktion der Potentialspannung ergab sich wieder der zuvor gemessene niedrige Strom.

## 7.2 Beobachtung der Potentialströme der Sektoren

Durchschläge in der Potentialebene zeigen sich in kurzzeitigem Ansteigen des Potentialstroms, der danach wieder auf den Ausgangswert zurückkehrt. Bei Dauerentladungen bleibt der Strom auf einem erhöhten Wert oder steigt kontinuierlich. Da die Potentialgitter der Sektoren statisch auf Hochspannungspotential liegen, ist das Messen der einzelnen Sektorenströme nur auf Hochspannungspotential möglich. Die von Hochspannungsnetzgeräten des Typs Oltronix HIGHPAC A2K5 - 20HR [Olt88] erzeugte Spannung zwischen 0 und  $2.5\text{ kV}$  wird über spezielle Hochspannungsverteiler an die Sektoren der einzelnen Driftkammern verteilt. In diese Hochspannungsverteiler beider Driftkammern sind Meßinstrumente zur Messung des Stroms eingebaut. Abbildung 7.1 zeigt die Schaltung des Hochspannungverteilers der CDC. Das Meßinstrument mit Flüssigkristallanzeige kann wahlweise zur Messung des Gesamtstroms oder des Stroms eines Sektors verwendet werden. Beim Helitron wird der Gesamtstrom und wahlweise ein Sektorenstrom über Trennverstärker auf ein niedrigeres Potential umgesetzt, wodurch die Anzeigeeinheit vom Hochspannungsverteiler getrennt werden kann. Bei den nominellen maximalen Potentialspannungen von  $1650\text{ V}$  bei der CDC fließt ein Gesamtstrom von etwa  $70\text{ nA}$ , beim Helitron sind es bei  $1630\text{ V}$  etwa  $50\text{ nA}$ . Beim Auftreten eines erhöhten Dauerstroms kann durch Durchschalten der Anzeigen der entsprechende Sektor lokalisiert werden. Durchschläge lassen sich als Bereichsüberschreitung auf der Gesamtstromanzeige erkennen, da aber zur Anzeige des Sektors dieser vorher ausgewählt werden muß, ist es kaum möglich, den Sektor, in dem eine kurze Entladung stattfand, zu lokalisieren.

Die Hochspannungsverteiler haben zusätzlich noch parallel zu ihren Aus-

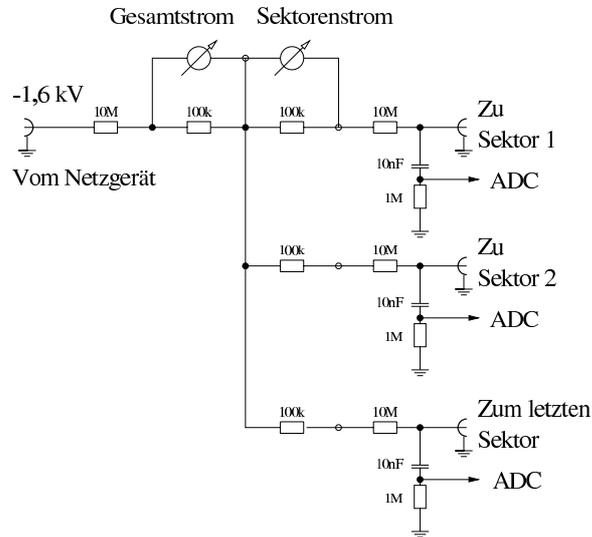


Abbildung 7.1: Prinzipschaltbild des Hochspannungsverteilers für die Potentialspannungen der CDC.

gängen durch Kondensatoren entkoppelte Anschlüsse, an denen zum Beispiel mit einem Oszilloskop schnelle Stromänderungen gegen Erdpotential gemessen werden. An diese Anschlüsse wurden zur Messung und Anzeige der Stromänderungen in den einzelnen Sektoren die im Anhang beschriebenen ADC des Typs ISM angeschlossen, um mit ihnen kontinuierlich Stromänderungen, wie sie von Entladungen verursacht werden, zu beobachten.

### 7.2.1 Messung und Anzeige der Stromänderungen

Um mehr über die in der Driftkammer ablaufenden Prozesse zu erfahren, die Entladungen besser verstehen und die Orte ihrer Entstehung lokalisieren zu können, wurde die Änderung der Potentialströme der einzelnen Sektoren während des Experiments kontinuierlich gemessen und dargestellt.

In Vorversuchen sollte herausgefunden werden, ob es mit den ISM überhaupt möglich ist, die von den Durchschlägen verursachten Stromänderungen zu messen. Dazu wurden die Signale an den kapazitiv entkoppelten Ausgängen dreier benachbarter Sektoren an ein ISM angeschlossen. Da die dabei

beobachteten Signale sich in Amplitude und auch Vorzeichen unterschieden, wurden die Signale als Durchschläge und dadurch in die Nachbarsektoren influenzierten Signale interpretiert.

Für das FOPI-Experiment wurden deshalb vier ISM mit je vier analogen Kanälen an die kapazitiven Ausgänge der CDC, und sechs ISM an die des Helitrons angeschlossen, wodurch für jeden Sektor ein Kanal zur Verfügung stand. Die Meßwerte wurden mit dem im Anhang beschriebenen Monitorprogramm auf einem PC dargestellt. Dabei zeigte sich, daß die serielle Kommunikation der ADC mit dem Computer die Ausleserate für beide Driftkammern auf etwa einen Meßwert für jeden Sektor alle 2 Sekunden beschränkte. Um eine höhere Ausleserate für das Helitron, das häufiger Entladungen zeigte, zu erhalten, wurden für die CDC nur alle fünf Sekunden Werte ausgelesen. Damit kann nur noch die Belastung der CDC zuverlässig gemessen werden. Beim Helitron konnten aber die Entladungen erkannt werden.

Je nach Eingangswiderstand können mit den ADC Spannungen oder durch Zuschalten eines eingebauten  $100\ \Omega$  Widerstands auch Ströme gemessen werden. Dabei unterscheiden sich die von den verschiedenen Meßmethoden gelieferten Signale. Für die CDC wurde die Spannungsmessung verwendet, die vor allem die Belastung der Driftkammer anzeigt, aber nur eine geringe Empfindlichkeit für Entladungen hat. Beim Helitron, bei dem viele Entladungen vorkamen, wurde die Strommessung, die nur auf Entladungen reagiert, verwendet.

### 7.2.2 Stromänderungen der CDC

Zur Messung der Signale an den kapazitiv entkoppelten Ausgängen des Hochspannungsverteilers wurde ein Spannungsmeßbereich von  $100\ mV$  bei den ISM verwendet. Aufgrund der kapazitiven Entkopplung wird bei unbelasteter Kammer keine Spannung gemessen. Die bei Kernreaktionen im Target emittierten Teilchen, die in der Kammer nachgewiesen werden, verursachen über die bei der Gasverstärkung erzeugten Ionen einen Anstieg des Potentialstroms, der auf der Stromanzeige des Hochspannungsverteilers erkannt werden kann. Auch die ISM liefern, da sie das durch den Kondensator differenzierte Signal messen, positive oder negative Werte, je nachdem, ob der ADC einen Stromanstieg oder einen Stromabfall gemessen hat. Die gemessenen Signale sind symmetrisch um  $0\ V$  und bilden im zeitlichen Verlauf Rechteckverteilungen (siehe Abbildung 7.2), was durch die Faltung der Aus-

leserate mit der zeitlichen Struktur des Schwerionenstrahls entsteht. In der Zeit setzt sich der „Schwerionenstrahl“ periodisch aus „Spill“ genannten Intervallen, in denen Ionen geliefert werden, und Strahlpausen zusammen. Ein Intervall von 10 Sekunden kann zum Beispiel aus 8 Sekunden Spill und 2 Sekunden Pause bestehen. Finden sich innerhalb einer Rechteckverteilung aufgesetzte Spitzen, die die flache Amplitude von etwa  $20\text{ mV}$  überschreiten, deutet dies auf Entladungen hin. Da die Meßwerte der einzelnen Sektoren mit unterschiedlichen Farben in das x-t-Display eingetragen wurden, konnte der entsprechende Sektor lokalisiert werden. Es zeigte sich, daß die Signale von unterschiedlichen ADC-Kanälen, also verschiedenen Sektoren kamen. Aufgrund der reduzierten Ausleserate wurden nicht alle Entladungen angezeigt. Abbildung 7.2 zeigt schematisch den typischen Verlauf der Anzeige während des Experiments.

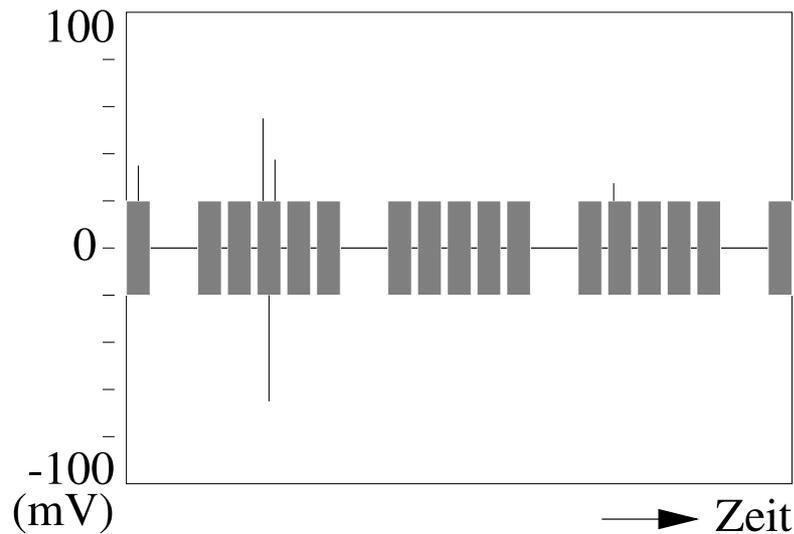


Abbildung 7.2: Zeichnung eines typischen Displays, das den zeitlichen Verlauf der an allen Sektoren der CDC gemessenen Stromänderungen zeigt. Die von den verschiedenen Sektoren gelieferten Spannungen überlagern sich zu Rechtecken, welche sich aus der Faltung der Ausleserate mit der Spillstruktur zusammensetzen. Die Amplitude, also die Höhe der Blocks, ist von der Belastung der Driftkammer durch registrierte Teilchen und damit vom Strahlstrom abhängig. Da die Werte der einzelnen Sektoren verschiedenfarbig markiert waren, konnten die vereinzelt auftretenden, größeren Spannungsänderungen einzelnen Sektoren zugeordnet werden. Es zeigte sich im Experiment, daß die Peaks von wechselnden Sektoren ausgehen; es konnten daher keine besonders auffälligen Sektoren identifiziert werden.

### 7.2.3 Stromänderungen im Helitron

Das Helitron produzierte im Experiment häufig starke Entladungen, die in früheren Experimenten nur auf einem mechanischen x-t-Schreiber, der am Strommeßwiderstand des Hochspannungsnetzgeräts angeschlossen war, beobachtet werden konnten. Für den Versuch, diese Entladungen über die ADC nachzuweisen und einzelnen Sektoren zuzuordnen, wurden verschiedene Meßarten und Meßbereiche der ADC untersucht. Mit einem Strommeßbereich von  $1\ \mu A$ , der schon ein deutliches Rauschen zeigt, konnten eindeutige Signale erkannt werden. Die Meßwerte wurden vom Computer mit einer Ausleserate von  $1\ Hz$  in eine graphische x-t-Anzeige eingetragen. Einmaliges Abweichen der mit den ISM gemessenen Werte konnte den vom x-t-Schreiber aufgezeichneten Stromänderungen im Potentialstrom der gesamten Kammer zugeordnet werden. Dabei wurde für einen Sektor ein erheblich höheres Signal als für die anderen Sektoren beobachtet. Diese zeigten nur geringfügig über dem Rauschen liegende Signale von etwa gleicher Amplitude. Daher wurde die Entladung dem Sektor mit dem höchsten Signal zugeordnet. Da alle Abweichungen das gleiche Vorzeichen besaßen, können diese Signale nicht von Influenz erzeugt worden sein, sondern werden wahrscheinlich, von einem durch den Stromanstieg verursachten Einbruch der Hochspannung für die ganze Kammer verursacht. Das höchste Signal, also die Entladungen sind, von wechselnden Sektoren verursacht, obwohl bestimmte Sektoren, wie etwa Sektor 14 etwas häufiger angezeigt werden. Eine von der Belastung der Kammer beeinflusste Struktur wie bei der Spannungsmessung konnte im Strommeßbereich nicht festgestellt werden.

# Kapitel 8

## Verbesserung des Hochspannungssystem

### 8.1 Konditionierung der Driftkammern

Bei den Driftkammern können die Nennspannungen nur durch langsames Erhöhen der Potential- und Driftspannungen erreicht werden. Auch werden die Driftkammern nach einiger Zeit unter Hochspannung stabiler und erzeugen bei Belastung weniger Entladungen. Daher werden die Driftkammern längere Zeit vor dem Experiment auf Spannung gebracht, was „Konditionieren“ genannt wird.

Wenn sich beim Konditionieren die Entladungen häufen oder der Dauerstrom zu steigen beginnt, müssen die Spannungen für einige Zeit zurückgenommen werden. Da das Konditionieren lange dauert, und die unter Hochspannung stehenden Driftkammern wegen der Gefahr von Entladung ständig beobachtet werden müssen, wurde nach einer Möglichkeit gesucht, einen ansteigenden Strom zu erkennen, und dann die Spannung zu reduzieren oder ganz abzuschalten, um eine Beschädigung der Driftkammer durch sich ausbreitende Entladungen zu verhindern.

### 8.2 Stromüberwachung für den Driftstrom

Bei der Reinigung der CDC wurden, wie in Kapitel 4 beschrieben, in den Driftstufen Spuren von starken Entladungen gefunden. Da Entladungen in der

Driftebene nicht nur dort große Schäden anrichten, sondern auch die dabei entstehenden Elektronen in die Ausleseebenen driften und dort ebenfalls starke Entladungen verursachen, wurde eine elektronische Schaltung entwickelt, die Entladungen an der auftretenden Stromerhöhung erkennen und die Driftspannung abschalten kann. Gefährlich sind aber auch Veränderungen in den Spannungsteilern der Driftebenen; Kurzschlüsse über einzelne Widerstände oder eine vollständige Unterbrechung der Kette können lokal zu höheren Feldstärken und damit ebenfalls zu starken Entladungen führen. Fehler in den Spannungsteilern sind mit einer Änderung des normalerweise sehr stabilen Driftstroms verbunden und können dadurch erkannt werden. Daher sollte sowohl ein Anstieg als auch ein Absinken des Stroms zur Abschaltung der Driftspannung führen.

Die zur Erzeugung der Driftspannung verwendeten Hochspannungsnetzgeräte Typs FUG HCN 350 - 20000 können Spannungen bis zu  $30\text{ kV}$  bei Strömen bis zu  $10\text{ mA}$  liefern[FuG91]. Sie besitzen Anschlüsse zur Fernsteuerung und Fernanzeige von Spannung und Strom.

Die zur Stromüberwachung im Rahmen dieser Arbeit entwickelte Schaltung besteht aus einem aus zwei Operationsverstärkern aufgebauten Fensterkomparator, der die aus dem Hochspannungsnetzgerät zur Strommessung herausgeführte Spannung mit zwei das Stromfenster definierenden Grenzwerten vergleicht. Diese werden mit zwei Potentiometern aus einer Referenzspannung erzeugt. Bei Überschreitung eines der beiden Grenzwerte wird die mit einem Relais aufgebaute Selbsthalteschaltung abgeschaltet, wobei mit einem Kontakt des Relais auch die Steuerspannung des Netzgeräts, welche die Hochspannung bestimmt, unterbrochen wird. In Abbildung 8.1 ist der Schaltplan für die Schaltung mit Fensterkomparator und Selbsthalteschaltung zu sehen. Um beim Abschalten schnelle Spannungsänderungen zu vermeiden, die ebenfalls Entladungen verursachen können, wurde zusätzlich noch ein Kondensator zwischen den Kontakt des Relais und das Netzgerät eingefügt, der durch seine Entladung mit einer Zeitkonstante von 10 Sekunden das Absinken der Steuerspannung und damit auch der Hochspannung verzögert.

Abbildung 8.2 zeigt das Zusammenwirken der Schaltung mit der Fernsteuereinheit des Netzgeräts. Da das Relais beim Einschalten stromlos ist und es nur bei einem Strom zwischen den vorgegebenen Grenzwerten eingeschaltet werden kann, muß der Relaiskontakt zum Verändern der Driftspannung oder zum Wiedereinschalten mit dem Schalter  $S$  überbrückt werden. Liegt der Strom im vorgegebenen Fenster, so kann das Relais mit dem Ta-

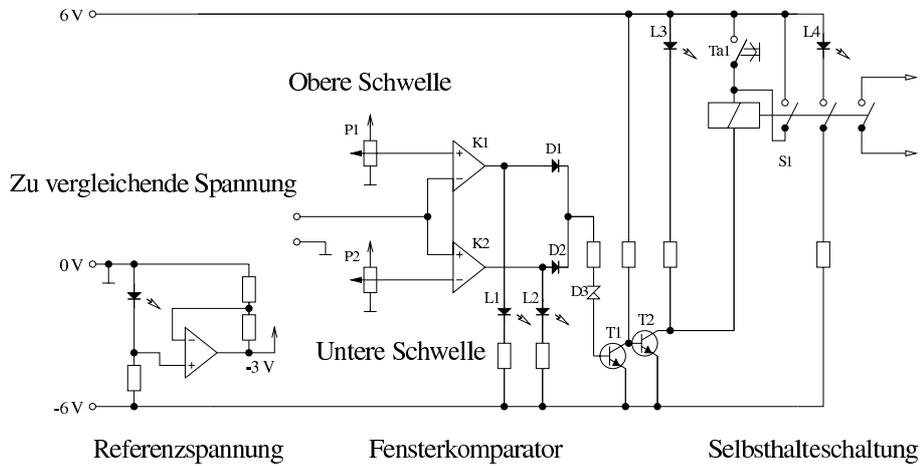


Abbildung 8.1: Schaltplan für die zur Überwachung des Driftstroms entwickelte Schaltung

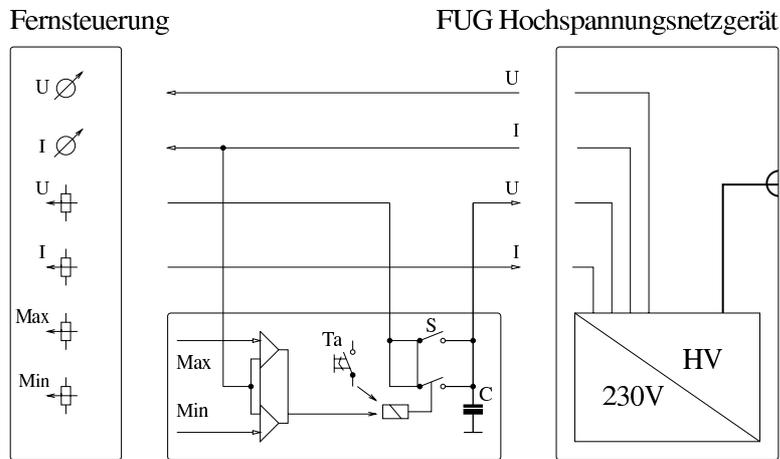


Abbildung 8.2: Blockschaltbild der in die Fernsteuereinheiten eingebauten Schaltungen zur Stromüberwachung

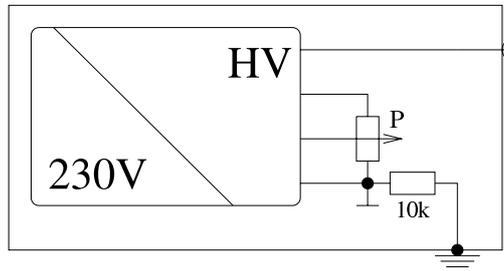


Abbildung 8.3: Blockschaltbild zur Strommessung am Oltronix-Hochspannungsnetzgerät. Der Strom kann zwischen Gerätemasse  $\perp$  und Erde mit dem  $10\text{ k}\Omega$  Widerstand gemessen werden. Ein über diesen Widerstand fließender  $50\text{ Hz}$  Wechselstrom erzeugt ein größeres Signal, als der normale Potentialstrom. Mit dem Potentiometer P wird die Ausgangsspannung vorgewählt.

ster  $Ta$  aktiviert werden und nach Öffnen des Schalters  $S$  wird der Strom auf Änderungen überwacht. Bei geschlossenem Schalter kann die Schaltung, da der Zustand des Relais auch von einer Leuchtdiode angezeigt wird, zur dauerhaften Anzeige von kurzfristigen Stromänderungen dienen.

Für die Schaltung wurde mit dem Programm OrCAD [OrC91] ein Platinen-Layout erstellt. Je eine Schaltung wurde in die Fernsteuereinheiten der Hochspannungsnetzgeräte von CDC und Helitron eingebaut. Diese Schaltungen haben sich in einer mehrwöchigen Konditionierungsphase und in einem nachfolgenden Experiment bewährt; auch nachts konnten die Kammern auf Hochspannung bleiben. Es gab einige, offensichtlich von Entladungen verursachte Abschaltungen. Nach einem Stromausfall wurde durch die Schaltungen ein unkontrolliertes Einschalten der Hochspannung verhindert.

### 8.3 Stromüberwachung für den Potentialstrom

Beim Konditionieren treten in der Potentialebene einerseits Durchschläge und andererseits Dauerentladungen auf. Während sich die Entladungen kaum vermeiden lassen und ihre Anzahl meistens mit der Zeit abnimmt, muß bei ansteigendem Strom, der auf Dauerentladungen hinweist, die Potentialspan-

nung reduziert werden.

Um auch den Potentialstrom überwachen und abschalten zu können, wurde eine Schaltung, wie sie für die Driftspannung entwickelt wurde, aber mit nur einem Komparator für den Maximalwert, aufgebaut. Bei den Hochspannungsnetzgeräten des Typs Oltronix HIGHPAC A2K5 - 20HR, die die Potentialspannung liefern, ist nur die Fernsteuerung und Fernanzeige der Spannung vorgesehen. An einem eingebauten Widerstand von  $10\text{ k}\Omega$  kann, wie in Abbildung 8.3 zu sehen, der Strom gemessen werden. Bei der Messung der daran abfallenden Spannung zeigte sich jedoch, daß nach dem Einschalten des Netzgeräts eine Wechselspannung von etwa  $13\text{ mV}$  und  $50\text{ Hz}$  an diesem Widerstand abfällt. Dieser von einem bauartbedingten Leckstrom verursachte Brumm ließ sich trotz langwieriger Versuche nicht beseitigen und machte einen genauen Vergleich mit einer vorgegebenen Schwelle sehr schwierig. Da die Überwachungsschaltung die Wechselspannung registriert, muß der Grenzwert für den Potentialstrom sehr hoch gesetzt werden, was die Empfindlichkeit reduziert. Trotzdem konnte die in die Fernsteuereinheit für die Potentialspannung des Helitrons eingebaute Schaltung im Rahmen der erwähnten reduzierten Empfindlichkeit eingesetzt werden. Sie diente einerseits zur Anzeige der unregelmäßig aufteretenden Entladungen und wurde auch, bei etwas reduzierter Potentialspannung, was die Häufigkeit der Durchschläge reduziert, zur Abschaltung bei zu hohem Dauerstrom eingesetzt. Der in Abschnitt 7.2.3 erwähnte mechanische x-t-Schreiber, der ebenfalls an diesem Widerstand des Netzgeräts angeschlossen war, reagierte aufgrund seiner Trägheit nicht auf die Wechselspannung.



# Kapitel 9

## Zusammenfassung und Ausblick

Um die Betriebsbedingungen der Driftkammern des FOPI-Detektors zu messen, wurde ein Monitorsystem aufgebaut. Mit diesem können wichtige Parameter wie Gaszusammensetzung, Druck, Temperatur und magnetische Feldstärke erfaßt werden. Die Daten werden als Funktion der Zeit in einem PC zwischengespeichert und graphisch dargestellt. Die vom PC daraus erzeugten Dateien können dann ausgewertet und interpretiert werden.

In dieser Arbeit wurden die zur Messung der genannten Größen eingesetzten Sensoren beschrieben, ihre Funktionsweise sowie die durchgeführten Kalibrierungen erläutert.

Das Gesamtsystem kam in einem dreiwöchigen FOPI-Experiment zum Einsatz. Die während dieses Experiments aufgezeichneten Parameter der FOPI-Driftkammern wurden in dieser Arbeit ausgewertet und diskutiert.

Durch die neu eingesetzten Regelventile konnte eine konstante Gaszusammensetzung erreicht werden.

Die kontinuierliche Aufzeichnung des Sauerstoffgehalts des Abgases der Driftkammern zeigte, daß sich auch die Gasqualität verbessert hat. Dies ist wohl auf die konsequente Verwendung von Edelstahlrohren anstelle der früher verwendeten Kunststoffrohre im Gassystem zurückzuführen. Eine weitere Reduktion des Sauerstoffgehalts könnte durch eine verbesserte Abdichtung der Kammern selbst erreicht werden.

Ein neu installiertes Kühlsystem für das Innere des FOPI-Magneten konnte nach anfänglichen Einstellschwierigkeiten eine bis auf  $\pm 0,5^\circ\text{C}$  konstante Temperatur gewährleisten. Die aufgezeichneten Temperaturen liegen je nach Erfassungsort zwischen  $22^\circ\text{C}$  und  $32^\circ\text{C}$ . An der Oberseite des Helitrons ma-

chen sich Schwankungen in der Kühlleistung am stärksten bemerkbar; über seine gesamte Höhe ergibt sich eine Temperaturdifferenz von  $1^{\circ}\text{C}$ . Die Messung des Absolutdrucks, welche, wie sich gezeigt hat, von der Temperatur beeinflusst wird, wird aufgrund der konstanten Temperatur während des Experiments nur gering verfälscht.

Die Abschätzung der Auswirkungen der gemessenen Veränderungen zeigt, daß vor allem die von der Wetterlage verursachten Schwankungen des Luftdruck großen Einfluß auf die Signale der Driftkammern haben. Da alle Meßwerte zusammen mit den Experimentdaten aufgezeichnet wurden, kann dies bei der Datenanalyse berücksichtigt werden. Eine Korrektur der von den unterschiedlichen Temperaturen an den Driftkammern verursachten Effekte könnte ebenfalls zu einer Verbesserung führen.

Durch die Messung der schnellen Änderungen der Potentialströme der einzelnen Sektoren konnte die Diagnose der Kammern verbessert werden. Dabei hat sich gezeigt, daß die Hochspannungsentladungen bei belasteter Driftkammer von nahezu allen Sektoren gleichmäßig verursacht werden.

Ein weiterer wichtiger Aspekt der Arbeit befaßte sich mit dem Entwurf und dem Aufbau von Schaltungen zur Überwachung der Drift- und Potentialströme beider Driftkammern des FOPI-Detektors. Für die Driftströme wurde eine solche Schaltung in die Fernsteuereinheiten der der Hochspannungsgeräte beider Kammern eingebaut. Diese fahren, wenn sie aktiviert sind, bei Über- oder Unterschreiten einstellbarer Stromschwellen die Hochspannung herunter. Dieses System hat sich beim Konditionieren und in einem nachfolgenden Experiment sehr gut bewährt.

Für die Kontrolle der Potentialströme wurde ein ähnliches System aufgebaut, das aber, bedingt durch die Bauart der hier verwendeten Hochspannungsgeräte, viel weniger empfindlich eingestellt werden kann. Außerdem wird bei den Potentialströmen angestrebt, die Sektoren getrennt zu überwachen, was eine Messung auf Hochspannungspotential erfordert und technologisch erheblich aufwendiger ist. Zusätzlich muß auch noch die Schwankung der Ströme in Abhängigkeit zum Schwerionenstrahl berücksichtigt werden. Die Lösung läuft dabei auf eine computergestützte Überwachung hinaus, was noch viel Entwicklungsarbeit erfordert.

Auch die für die Driftkammern verwendete Gasmischung bietet noch Entwicklungspotential, insbesondere im Bezug auf hohe Gasverstärkung und Alterungsverhalten.

# Anhang A

## ADC und Computer

Zur Messung und Aufzeichnung von Veränderungen der Betriebsbedingungen im Rahmen der hier beschriebenen Diplomarbeit wurde ein Computermeßsystem aufgebaut. Dieses besteht aus einem PC mit Ethernetanschluß und speziellen Analog to Digital Converter ADC des Typs Intelligentes Sensor Modul ISM110 der Firma Gantner [Gan94]. Abbildung A.1 gibt einen Überblick über das Meßsystem und die Standorte der verschiedenen ISM. Auf dem PC, der im Kontrollraum des FOPI-Experiments stand, lief ein mit LabVIEW erstelltes Programm, das die Meßwerte der ISM darstellte und über das Computernetz der GSI auf einer Festplatte speicherte. Von dort wurden die neuesten Werte an das Tenable Data Acquisition System TDAS [Pin95] genannte Datenaufnahmesystem des FOPI-Experiments weitergegeben, welches sie zusammen mit Daten des Experiments speicherte. Die ISM stehen in der Nähe der von ihnen ausgelesenen Sensoren und sind mit einer etwa 100 m langen seriellen Leitung über den ISK100 Schnittstellenkonverter mit dem PC verbunden. In Tabelle A.1 sind die mit den ISM aufgezeichneten Größen zusammengestellt.

### A.1 ADC des Typs ISM110

Jedes ISM besitzt einen ADC mit einer Auflösung von 16 Bit, der über einen Multiplexer bis zu 4 analoge Kanäle ausliest. Zwei Mikroprozessoren steuern den Meßvorgang und die Kommunikation über die serielle Schnittstelle. Von einem Mikroprozessor wird der Analogmultiplexer, ein programmierba-

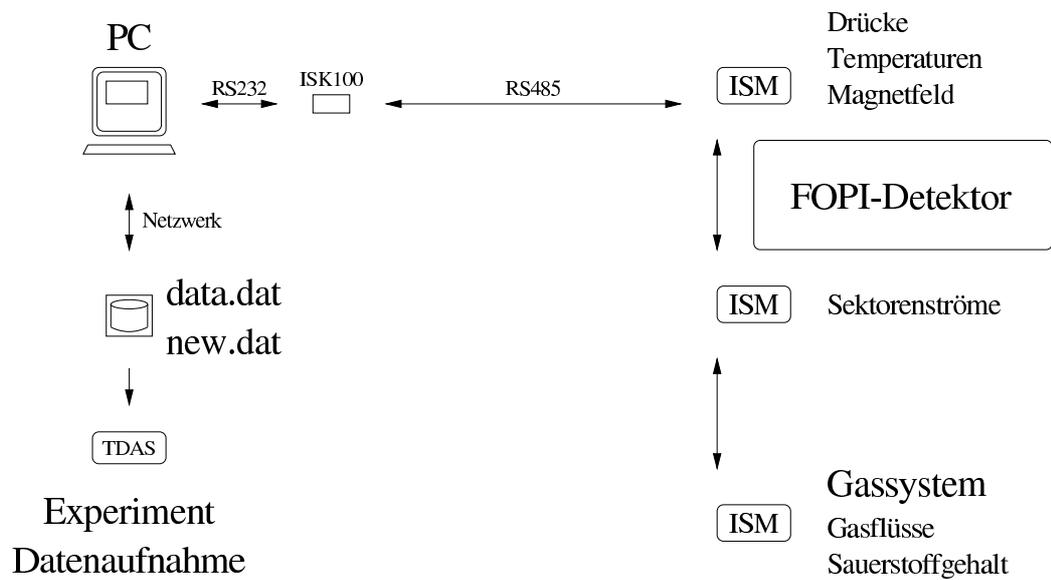


Abbildung A.1: Die Zeichnung zeigt schematisch das Meßsystem mit dem PC im Kontrollraum des FOPI-Experiments und die Intelligenten Sensor Module ISM, die in Cave B am Detektor und in einem Nebenraum am Gassystem Meßwerte aufnehmen. Über die Datei „new.dat“ werden die Werte an das Datenaufnahmesystem TDAS übergeben.

ISM	Kanal	Meßgröße	Meßbereich	Position
1	1	Gasfluß Argon	0-5V	3
	2	Gasfluß Isobutan		4
	3	Gasfluß Methan		5
	4	Gasfluß Argon durch Wasser		6
2	1	Gasfluß CDC	0-5V	7
	2	Gasfluß Helitron		8
	3	Unbelegt		9
	4	Sauerstoffgehalt	0-10V	10
3	1	Temperatur Kammergas CDC	0-0,5V	11
	2	Temperatur Oberseite CDC		12
	3	Differenzdruck CDC	0-5.4V	13
	4	Differenzdruck Helitron		14
4	1	Absolutdruck in der CDC	3V	15
	2	Magnetfeld	0-10V	16
	3	Temperatur Oberseite Helitron	0-0,5V	17
	4	Temperatur Unterseite Helitron		18
5	1-4	Unbelegt		19-22
6 - 9		Änderung der Potentialströme für die Sektoren der CDC	100mV	23 - 38
10 - 15		Änderung der Potentialströme für die Sektoren des Helitrons	1µA	39 - 62

Tabelle A.1: Die Tabelle faßt Busadresse der ISM, Meßgröße und verwendeten Meßbereich sowie die Position des Meßwerts in den Zeilen der vom PC erzeugten Dateien zusammen.

Betriebsspannung	10-30 V
Leistungsaufnahme	$\leq 1,5 W$
Maximale Buslänge	1200 m
ADC-Auflösung	16 Bit
Meßfehler im 10 V Meßbereich	0,03%
Linearität	0,01 %

Tabelle A.2: Die technischen Daten der ISM wurden der Beschreibung [Gan94] entnommen.

rer Verstärker und der ADC gesteuert. Der zweite Mikroprozessor übernimmt die Daten aus dem ADC, linearisiert sie nach vorgegebenen Eichkurven und sendet und empfängt Daten über die eingebaute serielle RS485 Schnittstelle. Er kann auch zwei digitale, als Eingang oder Ausgang konfigurierbare Anschlüsse steuern. Durch den programmierbaren Verstärker lassen sich ohne zusätzliche Peripherie Spannungen, Ströme und auch Widerstände in Meßbereichen zwischen  $\pm 10 V$  und  $\pm 6,25 mV$ ,  $25 mA$  und  $625 \mu A$  bzw.  $20 k\Omega$  und  $200 \Omega$  messen. Die Eingänge des ADC, die Spannungsversorgung und die serielle Schnittstelle sind voneinander galvanisch getrennt. Weitere interessante technische Daten sind in Tabelle A.2 zusammengefaßt.

### Anschlüsse der ISM

Die ISM besitzen je zwei 6polige Schraubklemmen. Auf einer davon liegen die 4 analogen Eingänge, eine gemeinsame Masse und eine stabilisierte Spannung von 5 V. Zum Anschluß der Meßkabel von den Sensoren wurde eine Adapterplatine mit 4 LEMO-Buchsen an die analogen Eingänge angeschlossen. An der anderen Klemme liegen die Anschlüsse für Spannungsversorgung, serielle Schnittstelle und die beiden digitalen Ein- und Ausgänge.

### Verbindung mit dem PC

Die ISM werden an einen seriellen Bus nach Spezifikation RS485 angeschlossen. Für einen Computer mit serieller Schnittstelle nach RS232 wird ein Konverter wie zum Beispiel der ISK-100 benötigt. Als Verbindung zwischen Kon-

Sensor	Meßgröße	Name der Linearisierung
McMillan 100-7	Gasfluß CDC	McMillan7c
McMillan 100-7	Gasfluß Helitron	McMillan7h
P160	Differenzdruck	P160
P130	Absolutdruck	P130
LM35	Temperatur	LM35
Hall-Sonde	Magnetfeld	Magn.Feld

Tabelle A.3: Die gemessenen Eichkurven wurden bei der Definition der „Sensoren“ genannten Umrechnungstabellen der ISM verwendet.

verter und den ISM untereinander genügt dann eine zweiadrige, abgeschirmte Leitung. Um Reflexionen des Signals zu vermeiden müssen Anfang und Ende der Leitung mit Widerständen abgeschlossen werden.

### A.1.1 Konfiguration der ISM

Mit dem Konfigurationsprogramm PC-SW100 [Gan94] für Microsoft-Windows werden die ISM vor der Benutzung konfiguriert. Dabei werden dem ISM seine Busadresse, die Übertragungsgeschwindigkeit und andere Parameter für die serielle Kommunikation übergeben. Die Busadresse ist eine Zahl, mit der der PC die einzelnen ISM im ganzen System voneinander unterscheidet. Nach steigender Seriennummer wurden die ISM numeriert und diese Nummer wurde ihnen auch als Busadresse zugeteilt.

Die Umrechnung des gemessenen Wertes, meistens eine Spannung, in die physikalische Größe, etwa einen Druck, kann schon im ISM durchgeführt werden. Dazu wird eine Wertetabelle für jeden benutzten Kanal benötigt, die ebenfalls bei der Konfiguration eingegeben wird. Das Programm PC-SW100 verwaltet die Wertetabellen als „Linearisierung für Sensoren“. Die erstellten Linearisierungen sind unter den in Tabelle A.3 angegebenen Namen gespeichert.

Um ein Runden der Werte bei der Aufzeichnung zu vermeiden, wurden die Werte im Ganzzahlformat an den PC übermittelt. Tabelle A.4 zeigt die hierfür verwendeten Einheiten.

Spannung	$mV$
Gasfluß	$ml/min$
Temperaturen	$(1/1000)^{\circ}C$
Druck	$Pa$
Magnetfeld	Gauß

Tabelle A.4: Die Tabelle zeigt die in den Dateien zur Aufzeichnung verwendeten Einheiten. Die Flüsse der BROOKS Mass-Flow-Controller, und der Sauerstoffgehalt wurden als Spannungen aufgezeichnet.

## A.2 Computer

Zur Steuerung des Systems wurde ein PC mit einem 133MHz Pentium-Prozessor unter dem Betriebssystem MS-DOS 6.22 / Windows 3.11 verwendet. Der PC war mit einer Ethernetkarte an das Computernetz der GSI angeschlossen. Mittels SAMBA, eines UNIX-Programms, das den Zugriff auf Netzwerkplatten und Drucker ermöglicht, erhielt der PC Zugriff auf eine Festplatte im Netzwerk.

Eine Datei auf dieser Platte diente als Schnittstelle zur Datenaufnahme des Experiments. Die ISM waren über den ISK100 RS232  $\leftrightarrow$  RS485-Konverter an die zweite serielle Schnittstelle des PC angeschlossen.

## A.3 Software

### A.3.1 Die Programmiersprache LabVIEW

Das Programm zur Auslese, Darstellung und Protokollierung der Meßwerte wurde mit LabVIEW Version 4.0 erstellt, da nur für dieses System entsprechende Treiber lieferbar waren. LabVIEW von National Instruments [Nat95] ist eine moderne objektorientierte, graphische Hochsprache für die Computersysteme PC unter MS-Windows, Macintosh, Sun und HP-UX. Vorteile von LabVIEW sind die Ausrichtung auf eine graphische Bedienoberfläche, die bereits vorhandenen Objekte zur graphischen Darstellung von Daten und die Möglichkeit, verschiedene Prozesse quasi parallel ablaufen zu lassen.

### A.3.2 Die Programmierung

Programme und Unterprogramme in LabVIEW werden „virtuelle Instrumente“ genannt. Der Begriff „virtuelles Instrument“ kommt aus der Meßtechnik und beschreibt das Nachbilden eines realen Meßgeräts auf dem Computer. Die Programmierumgebung von LabVIEW besteht aus zwei Fenstern der graphischen Oberfläche von MS-Windows mit den Namen „Diagram“ und „Panel“. In Analogie zu einem elektrischen Gerät stellt das „Panel“ die Frontplatte mit den Bedienelementen und Anzeigen dar. Vordefinierte graphische Objekte wie Potentiometer, Schalter, analoge und digitale Anzeigen können auf der Frontplatte plaziert werden und erzeugen dabei gleichzeitig auf dem „Diagram“ ihre Variablen. Das „Diagram“ enthält das Programm, in dem Variablen ebenso wie Funktionen und Unterprogramme, wie in einem Blockdiagramm, durch graphische Objekte symbolisiert werden. Die Verknüpfungen zwischen den Objekten werden durch „verdrahten“ hergestellt.

### A.3.3 Das Programm

Das Programm besteht aus drei einzelnen, voneinander unabhängigen Unterprogrammen. Davon zeigen zwei die Stromänderungen der beiden Driftkammern an, das dritte liest alle 10 Minuten die Meßwerte aller ISM aus, stellt sie auf dem Bildschirm des PC dar und schreibt sie in zwei Dateien. Die Datei „new.dat“ wird jedesmal neu erzeugt und enthält nur die Meßwerte der letzten 10 Messungen. Sie wird über die Datenaufnahme des FOPI-Experiments zusammen mit den Experimentdaten und weiteren Parametern des Experiments aufgezeichnet. Zur Datei „data.dat“, die als Log-Datei für den Verlauf der Messung dient, werden die Meßwerte als Zeile hinzugefügt. Die Meßwerte sind in beiden Dateien im **American Standart Code for Information Interchange ASCII** Format gespeichert, was das Lesen der Werte auch mit anderen Programmen ermöglicht. Eine Zeile enthält die durch Tabulatoren getrennten Meßwerte einer Messung, denen die Anzahl der Meßwerte in der Zeile und die Uhrzeit der Messung vorangestellt sind.

Die beiden anderen Programme lesen mit maximaler Geschwindigkeit die zur Messung der Änderungen der Sektorenströme verwendeten ISM aus und stellen die erhaltenen Werte wie in Abschnitt 7.2.1 beschrieben, auf zwei, den Kammern zugeordneten x-t-Anzeigen graphisch dar.

Das Programm lief während des FOPI-Experiments über einen Zeitraum

von 3 Wochen ohne Probleme. Die Datei „data.dat“ hatte nach dem Ende des Experiments eine Größe von 1,3MByte erreicht.

## **A.4 Auswertung der Log-Datei**

Die Auswertung der Log-Datei „data.dat“ wurde mit dem Programmpaket **Physics Analysis Workstation PAW**, von CERN, durchgeführt. Die in dieser Arbeit gezeigten Bilder, die den Verlauf der Meßwerte über das Experiment zeigen, wurden mit diesem Programm erstellt.

# Literaturverzeichnis

- [Bes92] D. Best,  
Tracking mit der Hough-Transformation für die  
Zentrale Driftkammer des GSI-4 $\pi$ -Experiments,  
Diplomarbeit, Universität Mainz (1992)
- [Bes96] D. Best,  
Produktion positiv geladener Kaonen  
für Ni+Ni bei 1.45 und 1.93 AGeV  
Doktorarbeit, Universität Heidelberg (1996)
- [Bia89] S.F. Biagi,  
A multiterm Boltzmann analysis of Driftvelocity,  
diffusion, gain and magnetic-field effects  
NIM A283 (1989) 716-722
- [Blu93] W. Blum, L. Rolandi,  
Particle Detection with Drift Chambers,  
Springer-Verlag (1993)
- [Bro94] Brooks Instrument  
Installation and Operating Manual  
Series Digital MFC 4/94  
Part no. 541-C-AAA Rev. A  
Brooks Instrument B.V. (1994)
- [Cha79] G. Charpak,  
Some Developments in the Operation  
of Multiwire Proportional Chambers  
NIM 80 (1970) 13-34

- [Cha95] G. Charpak [Hrsg.]  
 Research on Particle Imaging Detectors  
 World Scientific Series Vol.6  
 Singapore (1995)
- [Dah93] H.G. Dahn,  
 Praxisbuch LabVIEW 3  
 IWT Verlag (1993)
- [FuG91] F.u.G.  
 FUG HCN 350 - 20000  
 Technische Unterlagen  
 F.u.G. Elektronik GmbH  
 Rosenheim (1991)
- [Gan94] Gantner  
 Intelligentes Sensor Modul  
 ISM 110  
 Gerätebeschreibung V2.00  
 Gantner electronic (1994)
- [Gob92] A. Gobbi,  
 A highly-segmented  $\Delta E$ -time-of-flight wall  
 as forward detector of the  $4\pi$ -system for  
 charged particles at the SIS/ESR accelerator  
 NIM A324 (1993) 156-176
- [Gru96] C. Grupen,  
 Particle Detectors  
 Cambridge University Press (1996)
- [Huk88] M. Huk,  
 Electron Attachment to Oxygen, Water  
 and Methanol in various Drift Chamber  
 Gas Mixtures  
 NIM A267 (1988) 107-119
- [Kad91] J.A. Kadyk,  
 Wire Chamber Aging  
 NIM A300 (1991) 436

- [Kow92] T. Kowalski,  
The gas gain process in Ar/CO<sub>2</sub>  
filled proportional tubes  
NIM A323 (1992) 289-293
- [Leo87] W.R. Leo,  
Techniques for Nuclear and Particle  
Physics Experiments  
Springer-Verlag (1987)
- [Mal36] L. Malter,  
Thin film field emission  
Phys. Rev. 50, 48(1936)
- [Mar95] C. Markert,  
Driftgeschwindigkeitsmessung zur Gasüberwachung  
im NA49-Experiment,  
Diplomarbeit, Universität Frankfurt (1996)
- [Moh96] S. Mohren,  
Ein FOPI-Experiment: <sup>40</sup>Ar auf <sup>40</sup>Ca bei einer  
Strahlenergie von 400MeV/Nukleon  
Doktorarbeit, Universität Heidelberg (1996)
- [Nat95] National Instruments  
LabVIEW 4.0  
User Manual  
National Instruments (1995)
- [Olt88] Oltronix  
HighPac A2K5 - 20HR  
Bedienungsanleitung  
Oltronix (1988)
- [OrC91] OrCAD  
Anleitungen zu den verschiedenen  
Programmpaketen von OrCAD V4.10  
OrCAD L.P. (1991)

- [Pan87] Panametrics  
Bedienungsanleitung  
SAUERSTOFFANALYSATOR DELTA F TYP A PLUS  
PANAMETRICS GmbH (1987)
- [Pin95] C. Pinkenburg,  
Flußeffekte geladener Pionen im System  
Au + Au bei  $E_p = 1A\text{GeV}$   
Doktorarbeit, Universität Heidelberg (1995)
- [Rit95] J. Ritman,  
The FOPI Detctor at SIS/GSI  
Nucl. Phys. B 44 (1995) 708-715
- [Sch96] C. Schröder,  
Private Mitteilung
- [Sod94] U. Sodan,  
Abbremsverhalten mittelschwerer Fragmente  
in zentralen Au + Au - Stößen  
bei  $E_p = 150$  bis  $800A\text{MeV}$   
Doktorarbeit, Heidelberg (1994)
- [Sto96] M. Stockmeier,  
PHIDOO Eine Testkammer für FOPI  
Diplomarbeit, Universität Heidelberg (1996)
- [Tie89] U. Tietze, Ch. Schenk  
Halbleiterschaltungstechnik  
Springer-Verlag (1989)
- [Ton55] L. Tonks,  
Particle transport, electric currents and  
pressure balance in a magnetically immobilized plasma  
Phys. Rev. 97, 1443(1955)
- [Ull85] W. Gerhartz [Hrsg.]  
Ullmann's Encyclopedia of  
industrial Chemistry  
VCH Verlagsgesellschaft (1985)

[Wes96] WESTPHAL  
Beschreibung für  
Reglerkarte 0150/03  
WESTPHAL Mess- und Regeltechnik (1996)

[Zar89] A. Zarubin  
Properties of wire chamber gases  
NIM A283 (1989) 409



# Danksagung

Hiermit möchte ich mich bei allen bedanken, die zu dieser Diplomarbeit beigetragen haben.

- An erster Stelle steht dabei Professor P. Braun-Munzinger, der die Diplomarbeit in der FOPI-Kollaboration an der GSI ermöglicht hat.
- Besonderer Dank gilt meinem Betreuer K. Hildenbrand für die gute Betreuung und das Interesse an dieser Arbeit. Seine reiche Erfahrung, besonders in der Anwendung von Physik hat entscheidend zu dieser Arbeit beigetragen.
- Für tatkräftige Unterstützung und gute Zusammenarbeit beim Aufbau und den Messungen am Gassystem möchte ich mich bei A. Gobbi und M. Stockmeier bedanken.
- Bei meinen Zimmerkollegen, G. S. Wang, K. Wisniewski, R. Kutsche und A. Devismes möchte ich mich für das gute Arbeitsklima bedanken. Die Diskussionen mit K. Wisniewski und insbesondere mit R. Kutsche über Physik und andere Dinge waren sehr interessant und lehrreich.
- Ein herzlicher Dank für die gute Zusammenarbeit geht an die Techniker M. Marquardt, A. Weinert, C. Schröder und G. Augustinski. Nur mit deren Hilfe konnten viele elektronische, mechanische und auch physikalische Probleme gelöst werden .
- Die Beobachtung der Stromänderungen am Helitron hätte ohne die Rossendorfer W. Neubert und D. Wohlfarth „Da war wieder einer - haste den gesehn?“ nur halb soviel Spaß gemacht.
- Für Rat und Beistand beim Umgang mit den den verschiedensten Computersystemen möchte ich mich bei C. Pinkenburg, Y. Leifels und N. Herrmann bedanken.
- Allen Mitgliedern der FOPI-Kollaboration, insbesondere der GSI-Gruppe ein Dankeschön für Diskussionsbereitschaft und allzeitige Hilfe.
- Auch allen anderen Mitarbeitern der GSI sei an dieser Stelle ebenfalls gedankt.

Vor allem aber möchte ich mich bei meinen Eltern bedanken, die mir das Studium ermöglicht haben.