Gasanalyse für das äußere Spurkammersystem des Hera-B Experiments

Diplomarbeit von Tobias Fox

Universität Rostock

Hamburg 1999

Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis

Tabellenverzeichnis

Einführung und Übersicht

Am Deutschen Elektronensynchrotron (DESY) in Hamburg befindet sich das Experiment Hera-B im Aufbau. Ziel ist die Bestimmung der CP-Verletzung im System neutraler B-Mesonen. Dazu werden Protonen aus dem Speicherring HERA (Hadron-Elektron-Ringanlage) bei einer Energie von $920\,GeV$ mit einem ruhenden Target zur Kollision gebracht. Aus dem Vergleich der Zerfallsraten der durch diese pN-Wechselwirkung entstandenen B^0- und $\overline{B}^0$-Mesonen in einen identischen CP-Eigenzustand geht das Maß der Verletzung der CP-Symmetrie hervor.
Zur Spurrekonstruktion und der Teilchenidentifizierung durch Energie- und Impuls-, Geschwindigkeits- und Reichweitenmessungen besteht der Hera-B Detektor aus mehreren Subdetektoren.
Einen wichtigen Subdetektor stellt dabei das äußere Spurkammersystem dar. Es ist als Driftkammersystem aus etwa 120 000 Einzeldraht-Driftzellen aufgebaut, in denen sich das Zählgas aus $65\% Ar$, $35\% CF_4$ und $5\% CO_2$ befindet. Von der Qualität dieses Zählgases hängt der erfolgreiche Betrieb des Spurkammersystems in Hinsicht auf Nachweiswahrscheinlichkeit und stabil hohe Driftgeschwindigkeit der Elektronen ab. Aus Kostengründen zirkuliert es in einem geschlossenen Gaskreislauf, um wiederverwendet zu werden. Veränderungen der Gaszusammensetzung, insbesondere durch unvermeidbare Luftlecks, sind zu erwarten. Eine kontinuierliche Gasanalyse ist daher notwendig, um Veränderungen quantifizieren und Schritte wie Gasreinigung, -austausch oder Kammerabschaltung einleiten zu können. Diese Aufgabe soll das **automatische Gasanalysesystem** bewältigen, das in dieser Diplomarbeit entwickelt und aufgebaut wurde und im folgenden vorgestellt wird.
Zu Beginn werden in Kapitel 1 die Motivation des Hera-B Experimentes und der Hera-B Detektor selbst beschrieben. In Kapitel 2 werden dann die Einflüsse verschiedener Gastypen auf den Driftkammerbetrieb vorgestellt. Daraus gehen die Rahmenbedingungen wie z.B. die geforderten Meßgenauigkeiten für das Analysesystem hervor. Alle Meßinstrumente und der technische Aufbau dieses Systems werden im dritten Kapitel eingeführt, und im Kapitel 4 werden erste Ergebnisse – meist aus Testversuchen – gezeigt. Mit Kapitel 5 folgt eine Zusammenfassung.

Kapitel 1

Hera-B

1.1 Die Motivation des Experiments

Symmetrien spielen in unserem alltäglichen Leben eine unauffällige, aber grundlegende Rolle. Wie selbstverständlich gehen wir davon aus, daß Naturgesetze unabhängig von Zeit und Ort gültig sind. Die Newtonschen Axiome gelten heute genauso wie zu den Lebzeiten ihres Entdeckers und noch viel früher. Auch sollte der Weg einer Billardkugel über zwei Banden vorwärts wie rückwärts prinzipiell möglich sein.
Für die Raumsymmetrie steht in der Physik die Paritätsoperation P. Unter ihrer Anwendung spiegeln sich alle Raumkoordinaten am Ursprung. Entfernt sich beispielsweise das Elektron nach einem β-Zerfall nach rechts vom zurückbleibendem Proton in einem entsprechend gewählten Koordinatensystem, dann entfernt es sich nach der P-Operation nach links. P-Symmetrie bedeutet, daß die Wahrscheinlichkeit für beide Prozesse gleich ist. Die Zeitumkehr, T-Operation, kehrt, wie der Name schon sagt, die Zeitrichtung um. Als dritte Symmetrie tritt die Ladungskonjugation C hinzu, die die Vorzeichen der inneren Quantenzahlen invertiert. Sie führt ein Teilchen in sein Antiteilchen über.
Eine Verletzung der kombinierten Symmetrien CP ist zuerst 1964 im System der neutralen K-Mesonen beobachtet worden. Langlebige K^0-Mesonen sind unter schwacher Wechselwirkung zu 0,2% in zwei Pionen zerfallen anstatt in die erwarteten drei. Eine grössere Verletzung ist der Voraussage nach bei Zerfällen neutraler B-Mesonen zu erwarten. Beide Phänomene könnten einen Hinweis auf das Mißverhältnis von Materie und Antimaterie im heutigen Universum geben.
Zu diesem Zweck werden die Experimente Babar, Cleo und CDF (jeweils USA), Belle (Japan), LHCb (CERN) und nicht zuletzt Hera-B am Deutschen Elektronensymchrotron (DESY) in Hamburg aufgebaut, bzw. aufgerüstet. Dabei ist Hera-B das einzige Experiment, das nicht als *Collider* konzipiert ist, sondern mit einem feststehenden Ziel (Target) arbeitet.

1.1.1 Das Unitaritätsdreieck

Das Standardmodell der Teilchenphysik beschreibt die elementaren Konstituenten der Materie und die fundamentalen Kräfte, unter denen sie miteinander wechselwirken. Die CP-Verletzung ist dabei mit der CKM-Matrix verknüpft, die im folgenden beschrieben wird.
Eine Gruppe der Elementarteilchen stellen die Quarks dar (siehe Tabelle 1.1), die neben der starken und elektromagnetischen auch der schwachen Wechselwirkung unterliegen. Die Übermittler dieser Kraft bilden die geladenen, schweren W^+- und W^-- und das neutrale Z^0-Boson.

Familie	Quarks	el. Ladung
1.	u	+2/3
	d	−1/3
2.	c	+2/3
	s	−1/3
3.	t	+2/3
	b	−1/3

Tabelle 1.1: Quarkfamilien und Quarkladungen

Insgesamt sind neun verschiedene Übergänge mit $W^{\pm}$-Bosonen möglich, deren Parameter sich in einer Matrix, der sogenannten Cabibbo-Kobayashi-Maskawa-Matrix, kurz V_{CKM}, zusammenfassen lassen:

$$V_{CKM} = \begin{pmatrix} V_{ud} & V_{us} & V_{ub} \\ V_{cd} & V_{cs} & V_{cb} \\ V_{td} & V_{ts} & V_{tb} \end{pmatrix} \tag{1.1}$$

Alle Parameter können komplex sein, was zu einer Zahl von 18 reellen Elementen führt. Die CKM-Matrix muß unitär sein: $V^t V^* = \mathbf{1}$. Das bedeutet physikalisch die Abgeschlossenheit der Übergänge. Es gibt keine weiteren Quarks als die sechs beschriebenen und beispielsweise auch keinen Übergang $c \to u$ unter Austausch eines neutralen Z^0-Bosons.
Durch die Unitaritätsbedingung erhält man

$$\sum_{i=u,c,t} V_{ij} V_{ik}^* = \delta_{ik}. \tag{1.2}$$

Eine Gleichung lautet

$$V_{ud} V_{ub}^* + V_{cd} V_{cb}^* + V_{td} V_{tb}^* = 0. \tag{1.3}$$

Lincoln Wolfenstein machte die Struktur der CKM-Matrix durch eine Parametrisierung deutlich [1]:

$$V_{CKM} \approx \begin{pmatrix} 1-\lambda^2/2 & \lambda & A\lambda^3(\rho - i\eta) \\ -\lambda & 1-\lambda^2/2 & A\lambda^2 \\ A\lambda^3(1-\rho-i\eta) & -A\lambda^2 & 1 \end{pmatrix}, \tag{1.4}$$

ρ und η müssen noch genau bestimmt werden ($A \simeq 0{,}8$, $\lambda \simeq 0,22$). Durch diese Parametrisierung wird Gleichung 1.3 zu

$$\frac{V_{ub}^*}{|\lambda V_{cb}|} + \frac{V_{td}}{|\lambda V_{cb}|} = 1. \tag{1.5}$$

Diese Bedingung läßt sich graphisch als Dreieck in der komplexen Ebene darstellen (Abb. 1.1). Der Ort der Dreiecksspitze befindet sich im Bereich der grau markierten Fläche (vgl. Gleichung 1.8). Das Hera-B Experiment möchte hauptsächlich den Winkel β bestimmen.

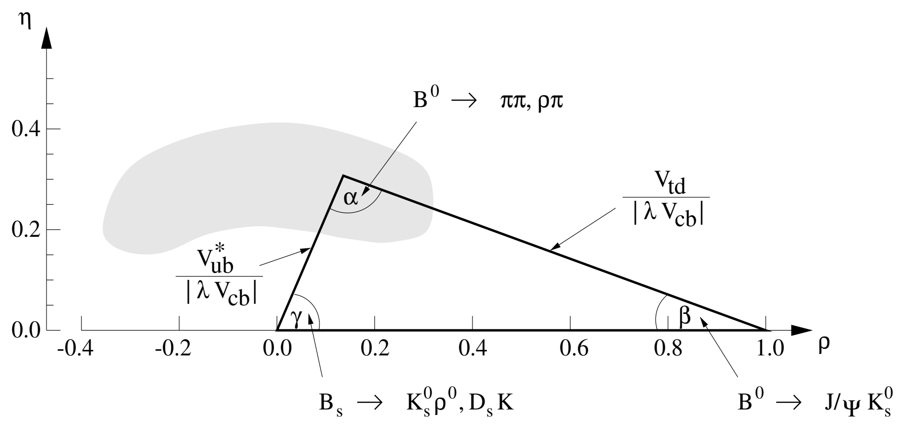

Abbildung 1.1: Das Unitaritätsdreieck in der komplexen Ebene. Mit welchen Zerfällen im B-System die verschiedenen Winkel bestimmbar sind, ist jeweils angedeutet. Bei Hera-B soll der Winkel β bestimmt werden.

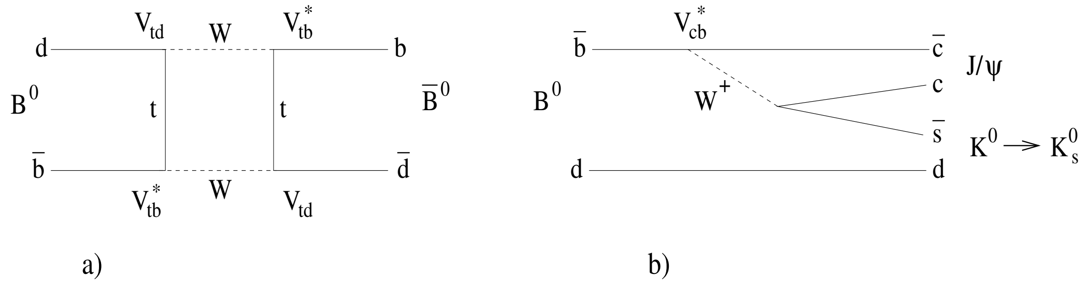

Abbildung 1.2: a) Boxdiagramm der $B^0\overline{B}^0$-Oszillation in Abhängigkeit der CKM-Parameter V_{tb} und V_{td}.
b) Feynmandiagramm des goldenen Zerfalls am Beispiel des B^0.

1.1.2 Der goldene Zerfall

Beim Hera-B Experiment werden Protonen mit einer Energie von 920 GeV/c^2 mit einem festen Target zur Kollision gebracht. Ein möglicher Zerfallskanal der erzeugten B^0-Mesonen ist der „goldene Zerfall“:

$$B^0 \to J/\psi K_s^0 \to l^+l^-\pi^+\pi^-, \tag{1.6}$$
$$\overline{B}^0 \to J/\psi K_s^0 \to l^+l^-\pi^+\pi^-. \tag{1.7}$$

Dieser Zerfall hinterläßt eine klare Signatur im Detektor (daher *golden*).
Beide Mesonen, B^0 wie auch $\overline{B}^0$, enden in einem identischen Zustand. Ohne CP-Verletzung sollten beide Zerfallsraten gleich sein. Ähnlich wie im System der neutralen K-Mesonen können die neutralen B-Mesonen ineinander übergehen, bevor sie zerfallen. Das Boxdiagramm in Abbildung 1.2 zeigt die $B^0\overline{B}^0$-Oszillation.
Ein Unterschied in den Zerfallsraten

$$\Gamma(B^0 \to J/\psi K_s^0) \quad \text{und}$$
$$\Gamma(\overline{B}^0 \to J/\psi K_s^0)$$

ist durch die Mischung beider Mesonen zu erwarten.
Die Zerfallsasymmetrie

$$\mathbf{A}_{CP} = \frac{\Gamma(\overline{B}^0 \to J/\psi K_s^0) - \Gamma(B^0 \to J/\psi K_s^0)}{\Gamma(\overline{B}^0 \to J/\psi K_s^0) + \Gamma(B^0 \to J/\psi K_s^0)} = \frac{x}{1+x^2}\sin(2\beta), \quad (1.8)$$

die bei Hera-B bestimmt wird, ist ohne wesentliche theoretische Unsicherheit gegeben und wird mit der Vorhersage des Standardmodells verglichen (x ist der B^0-Mischungsparameter).
Im goldenen Zerfall bildet unter anderem das $\overline{b}$-Quark des $b\overline{b}$-Paares ein B^0-Meson, während das b-Quark z.B in ein B^--Meson eingeht. Oder das b-Quark bildet ein $\overline{B}^0$-Meson und das $\overline{b}$-Quark ein B^+-Meson.
Das zweite B-Meson, bzw. deren Zerfallsprodukte dienen so der Kennzeichnung (dem*Flavour- Tagging*) der neutralen ersten B-Mesonen. Abbildung 1.3 zeigt den goldenen Zerfall eines B^0 zusammen mit seinem Tagging-Ast.

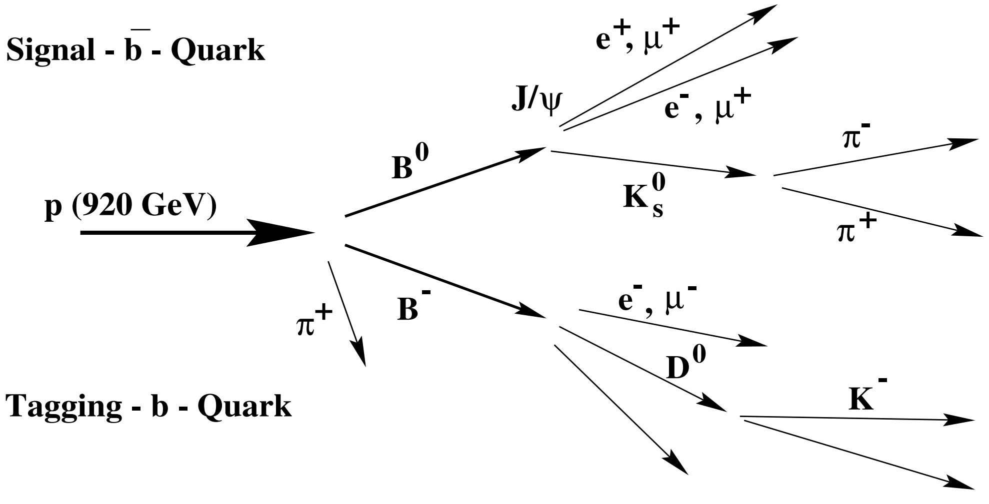

Abbildung 1.3: Der vollständige goldene Zerfall. Im oberen Zweig zerfällt entweder ein B^0- oder ein $\overline{B}^0$-Mesons, während der untere ihrer Identifikation (*Flavour-Tagging*) dient.

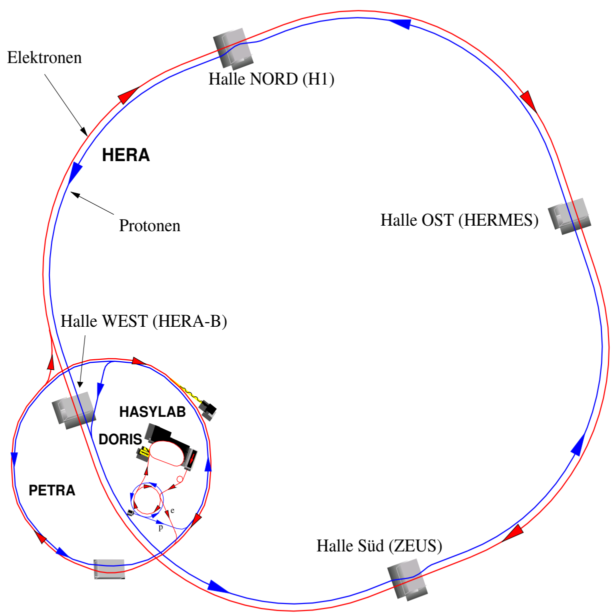

Abbildung 1.4: Die gesamte Anlage des DESY in Hamburg umfaßt neben dem HERA-Ring und seinen vier Experimentierhallen noch weitere kleine Ringanlagen wie DORIS und PETRA. Sie sind als Vorbeschleuniger ebenfalls wichtig für die Hera-Experimente.

1.2 Der Hera Speicherring und der Hera-B Detektor

1.2.1 Der Hera Ring

Der unterirdisch gebaute Speicherring Hera (von Hadron-Elektron-Ring-Anlage) mißt einen Umfang von 6336 Metern und beinhaltet einen Protonen- und einen Elektronenring. In vier Hallen besteht die Möglichkeit, Experimente aufzubauen (siehe Abbbildung 1.4). Das jüngste davon ist das Hera-B Experiment in der Halle West, das als einziges ausschließlich mit dem Protonenstrahl arbeitet.
Der Protonenstrahl besteht aus Bündeln (*Bunches*) zu je etwa 10^{11} Protonen bei einer Energie von 920 GeV. Sie passieren das Kollisionsziel (Target) mit einer Frequenz von 10 MHz, was einem Bunch-Abstand von 96 ns entspricht.

1.2.2 Das Target von Hera-B

Als Target dienen bei Hera-B acht Metalldrähte mit je einem Querschnitt von $500 \times 50\ \mu m^2$, die an eigenen, beweglichen Gabeln aufgehängt sind [2] (siehe Abb. 1.5). Der Abstand jedes Drahtes zum Strahl kann so individuell verändert werden. Das Ziel ist, eine Wechselwirkungsrate von 40 MHz zu erhalten, was im Mittel 4 pN-Wechselwirkungen pro Bunch entspricht. Für die Targetdrähte heißt das, daß sie nur in den äußersten Bereich des Strahles (in den sog. Halo) einzutauchen brauchen. Die Qualität des Strahles (Fokussierung, innere Energieverteilung) wird daher nicht beeinträchtigt. Sie kann durch das „Herausnehmen“ der Halo-Protonen sogar verbessert werden.

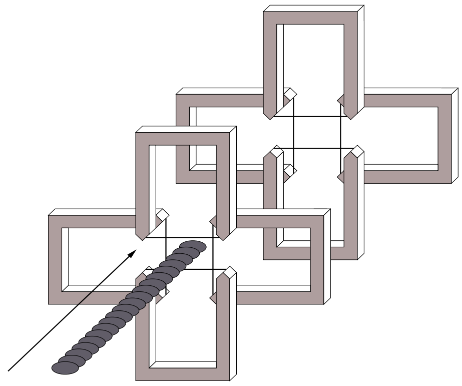

Abbildung 1.5: Schema des internen Drahttargets

1.2.3 Der Hera-B Detektor

Zur Identifikation aller Teilchen des goldenen Zerfalls sowie anderer Reaktionen sind eine Vielzahl von Detektorkomponenten notwendig, die zusammen den Hera-B Detektor bilden. Der asymmetrische Aufbau trägt den Flugbahnen der Teilchen in einem bewegten Schwerpunktsystem Rechnung (siehe Abb. 1.6). Der Detektor deckt den Winkelbereich von 10 bis 220 $mrad$ ab $(0,6° - 12,6°)$, was 90% des Raumwinkels entspricht, in dem Teilchen auftreten werden.
Durch die hohe Anzahl der nachzuweisenden geladenen Teilchen – durchschnittlich 200 alle 96 ns –, muß der Detektor widerstandsfähig gegenüber der Strahlungbelastung sein und eine ausreichende Spur- und Energieauflösung bieten.
Für die Datenauswertung kann der Großteil der Messungen aufgrund der Entstehungsrate von 40 MHz nicht gespeichert werden. Ohnehin ist der goldene Zerfallkanal zu anderen Wechselwirkungen um den Faktor 10^{11} unterdrückt. Ein Triggersystem muß daher die interessanten Ereignisse sofort herausfiltern.

Der Vertexdetektor

Der Siliziumstreifenzähler befindet sich direkt hinter den Targetdrähten. Er bestimmt die Vertices (Zerfallspunkte und Spuranfänge geladener Teilchen) des goldenen Zerfalls mit einer Ortsauflösung von 50 μm.

Das innere und äußere Spurkammersystem

Beide Detektoren rekonstruieren die Spuren geladener Teilchen. Das innere Spurkammersystem besteht aus Mikrostreifengaskammern in 10 Ebenen im nahen Strahlrohrbereich mit hoher Teilchendichte. Sie bieten eine Ortsauflösung von 80 μm. Das äußere Spurkammersystem besteht aus Einzeldraht-Driftkammern in 13 Ebenen mit einer Ortsauflösung von ca. 200 μm.
Die nachzuweisenden Teilchen ionisieren ein Gasmedium und erzeugen so Elektronen frei, die auf Anodenstreifen- bzw. -drähte driften und dort einen elektrischen Puls auslösen. Von der gleichbleibenden Zusammensetzung des Gasmediums, dem **Zählgas**, hängt der erfolgreiche Betrieb des äußeren Spurkammersystems ab. Diese Überwachung zu gewährleisten ist Gegenstand dieser Arbeit.
Ein Dipolmagnet mit einem magnetischen Feldintegral von 2,1 Tm führt zur Ablenkung der Teilchen. Aus dem Krümmungsradius ihrer Flugbahn läßt sich auf den Teilchenimpuls schließen. Auf

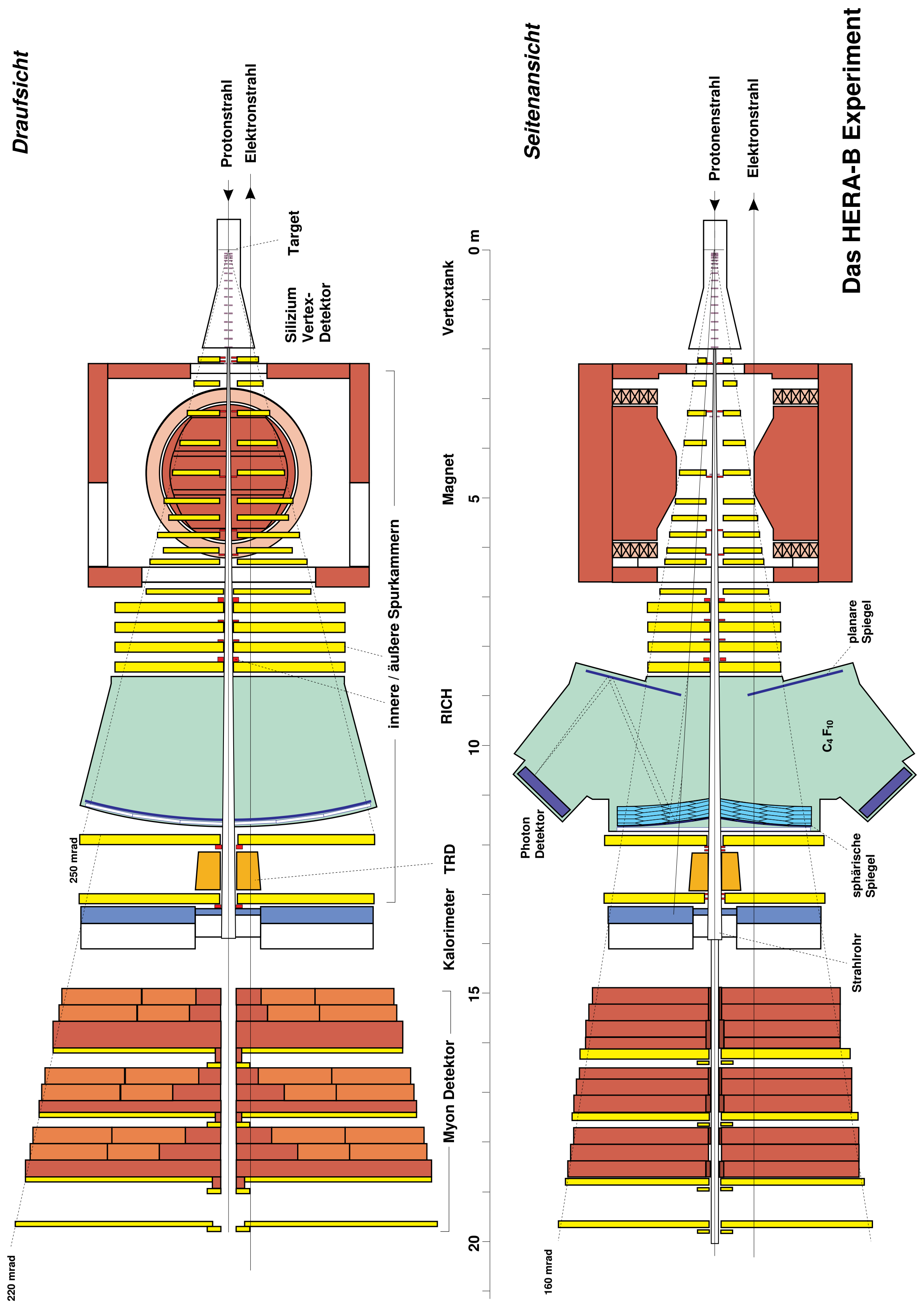

Abbildung 1.6: Schematischer Schnitt durch den Hera-B Detektor (Protonenstrahl von oben kommend). Die Abkürzung TRD steht für *Transition Radiation Detektor* (Übergangsstrahlendetektor), RICH für *Ring Imaging Čherenkov Counter* (Čerenkov Zähler).

die äußeren Spurkammern wird in Kapitel 1.3 näher eingegangen.

Der Čerenkov Zähler

Der Ringbild-Detektor ermittelt unter Ausnutzung des Čerenkov-Effektes die Geschwindigkeit eines Teilchens und ermöglicht zusammen mit der Impulsmessung aus anderen Detektorkomponenten die Messung der Teilchenmasse.

Der Übergangsstrahlungsdetektor

Er ist für eine verbesserte Elektron-Hadron Separation vorgesehen. Beim Übergang durch zwei optisch verschiedene Medien emitieren geladene Teilchen – insbesondere Elektronen und Positronen wegen ihrer kleinen Masse – Photonen in Abhängigkeit ihrer Energie.

Das elektromagnetische Kalorimeter

Zur Energiemessung von Photonen sowie Elektronen und Positronen werden ihnen alternierende Schichten Absorber- und Szintillatormaterial entgegengestellt. Aus den von ihnen erzeugten elektromagnetischen Schauern ist ihre Energie bestimmbar.

Der Myondetektor

Identifikation der Myonen ermöglichen Proportionalkammern, die in vier Ebenen jeweils hinter ca. ein Meter dicken Stahl- bzw. Betonplatten aufgebaut sind, die nur für Myonen aufgrund ihrer geringen Wechselwirkung mit Materie passierbar sind.

Trigger und Datenaufzeichnung

Das vorrangige Ziel der Datenauswertung ist die Trennung interessanter von uninteressanten Ereignissen innerhalb kürzester Zeit. Hierfür findet ein mehrstufiges Triggersystem Verwendung.
Mit wenigen Subdetektoren werden Ereignisse auf die markante Signatur des goldenen Zerfalls hin untersucht (z.B. Leptonenpaar mit invarianter Masse eines J/ψ). In den nächsten Triggerstufen werden die Ereignisse unter Heranziehung der Daten weiterer Subdetektoren genauer rekonstruiert und der Charakteristik des goldenen Zerfalls nach herausgefiltert. Im Mittel wird ein Ereignis von $2 \cdot 10^6$ vollständig rekonstruiert und aufgezeichnet.

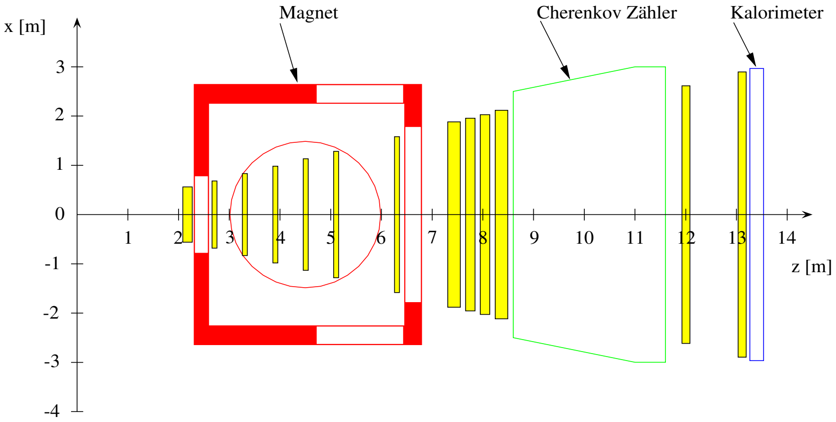

Abbildung 1.7: Positionen und Größen der 13 Ebenen des äußeren Spurkammersystems im Hera-B Detektor (Protonenstrahl von links kommend).

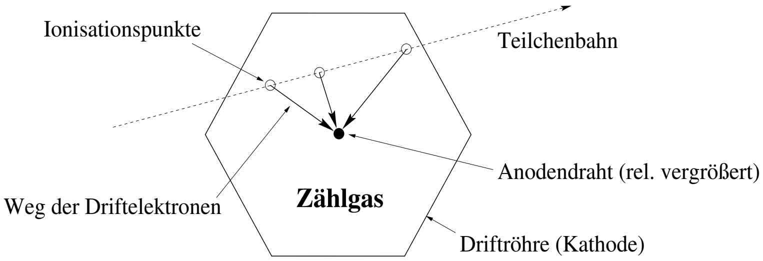

Abbildung 1.8: Entstehungsprozeß eines Spannungspulses in einer Driftzelle, nachdem ein geladenes Teilchen beim Durchflug Gasmoleküle ionisiert hat.

1.3 Das äußere Spurkammersystem

In 13 Ebenen mit einem Abstand von ca 2 bis 13 Metern Entfernung vom Wechselwirkungspunkt befinden sich die äußeren Spurkammern (Abb. 1.7). Ihre Fläche vergrößert sich von $0,9 \times 0,6\ m^2$ für die ersten Kammern auf $6,5 \times 4,6\ m^2$ für die letzten. Die Ebenen 2 bis 7 befinden sich innerhalb des Magnetfeldes [3].

1.3.1 Das Prinzip der Driftkammern

Die Aufgabe der Driftkammern ist die Bestimmung möglichst vieler Raum- und Zeitpunkte der Teilchenbahnen. Dafür nutzt man den Effekt, daß hochenergetische geladene Teilchen unter elektromagnetischer Wechselwirkung Gasmoleküle entlang ihrer Flugrichtung ionisieren. Befindet sich das Gas zudem in einem elektrischen Feld, dann driften die freigesetzten Elektronen in Richtung Anode, die Ionenrümpfe in Richtung Kathode. Abbildung 1.8 zeigt eine einzelne Driftzelle in Form einer Röhre mit einem Draht als Anode in ihrer Mittelinie.

In einem durch diese Bauweise erzeugten radialen Feld ionisieren die primären Elektronen in Anodennähe wieder Gasmoleküle, so daß nach lawinenartiger Vermehrung (Gasverstärkung) ein Schauer driftender Elektronen auf die Anode treffen. Der meßbare Spannungspuls entspricht der Information, daß jetzt in dieser Driftzelle ein geladenes Teilchen wechselgewirkt hat.

Der Strompuls wird bei einer Schwelle von $1\ fC$, was circa 6200 Elektronen entspricht, vorverstärkt

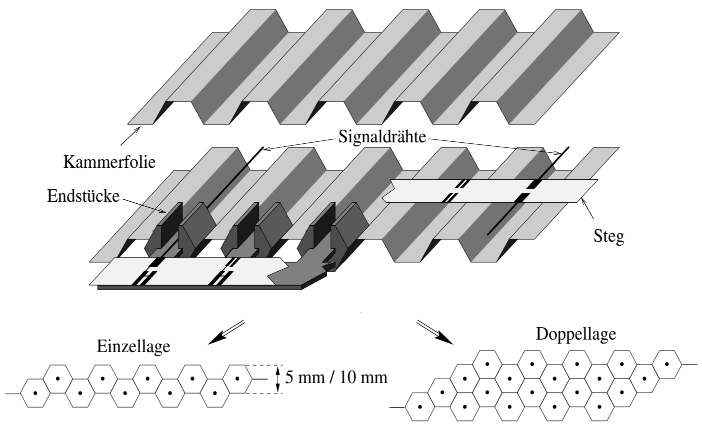

Abbildung 1.9: Detail des Aufbaus einer Driftkammerlage. Durch Übereinnanderlegen von vorgefalteten Folien werden mehrere Lagen Driftröhren aufgebaut.

und digitalisiert. Aus der Pulsform und seiner Ankunftszeit relativ zur Bunch-Target-Begegnung, erhält man die Driftzeit und daraus den Abstand des detektierten Teilchens zur Anode.

1.3.2 Der Aufbau der Kammern

Bei der Konstruktion hat man sich für Driftröhren mit sechseckigem Querschnitt, sogenannten Honigwaben-Driftröhren, entschieden. Je nach Position in den Driftkammern ist eine Driftröhre von 30 cm bis zu 4 m lang. Eine Driftkammer besteht aus mehreren Lagen nebeneinanderliegender Driftröhren. In Abbildung 1.9 ist das Aufbauprinzip dieser Lagen zu sehen.

Kapitel 2

Gassystem und Zählgas

Nach Inbetriebnahme des äußeren Spurkammersystems ist die Qualität des Zählgases ein Parameter, der dessen physikalische Eigenschaften verändern kann. Da außerdem Schwankungen in der Gaszusammensetzung unvermeidbar sind (siehe weiter unten), ist eine kontinuierliche Kontrolle des Zählgases während der Meßphase von Hera-B notwendig. In dieser Diplomarbeit soll solch ein automatisches Analysesystem entwickelt und aufgebaut werden. In diesem Kapitel werden das Gassystem der Spurkammern und die wichtigsten physikalischen Eigenschaften des Zählgases vorgestellt.

2.1 Das Gassystem

Das Zählgas der äußeren Spurkammern ist ein Gemisch aus 65% Argon 30% CF_4 und 5% CO_2. Im normalen Betrieb werden erfahrungsgemäß einige Störeffekte auftreten. So ist es praktisch kaum möglich, eine zur Außenwelt hermetisch dichte Kammer zu bauen. Das Eindringen von Luft (-Sauerstoff, -Stickstoff und -Wasser) durch Lecks ist zu erwarten. Die unter Strahlbetrieb erzeugten Ionen können ferner nicht vollständig rekombinieren und stellen als Ladungspunkte eine Störung des elektrischen Feldes in den Driftröhren dar. Auch ist zu bedenken, daß sich Polymere aus gespaltene Molekülradikalen auf den Elektroden anlagern.
Das Zählgas muß folglich in den Driftkammern regelmäßig ausgetauscht werden. Das Volumen aller Kammern (22,84 m^3) und der Preis des Gasgemisches – eine Füllung mit einem 30%igem CF_4-Gemisch kostet knapp 1280 Euro – zwingt zum Bau eines geschlossenen Gaskreislaufes.
In Abbildung 2.1 ist schematisch der Weg des Zählgases von den Reingasflaschen bis in die Driftkammern und zurück zu sehen. Aus den je 450 Liter fassenden Tanks mit flüssigen Argon und Kohlendioxid und einem 600 Liter-Flaschenbündel mit Tetrafluormethan gelangen die Komponenten reguliert durch elektrische Massenflußregler in einen Mischbehälter und von dort in einen $1,5\,m^2$-Vorratstank (Betriebsdruck 1-3 bar). Die Einstellungen der Massenflußregler bestimmen das Mischverhältnis des Zählgases.
Ein Pumpenensemble betreibt den Kreislauf. Der Fluß beträgt ein Kammervolumen pro Stunde, also ca. 23 m^3/h. In einer Verteilerstation wird die Hauptgasleitung in 26 Eingangsleitungen aufgeteilt und die 26 Ausgangsleitungen werden wieder zusammengefaßt. An dieser Stelle wird der Fluß zu und von jeder Kammer und ihr Druck elektronisch geregelt (mittels Massenflußreglern und Druckmessern).

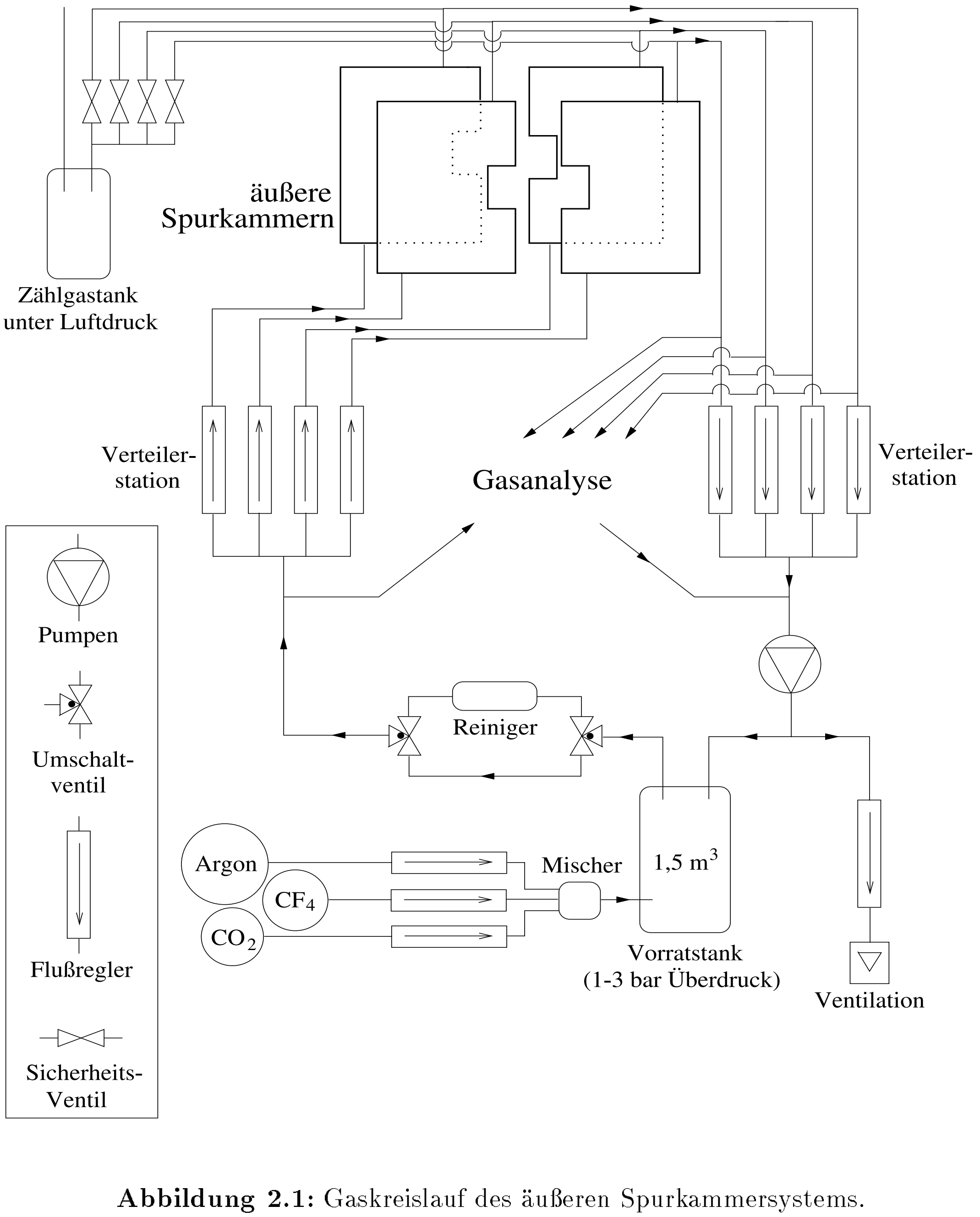

Abbildung 2.1: Gaskreislauf des äußeren Spurkammersystems.

In Notfällen können die Kammern separat mit magnetischen Ventilen vom Gassystem abgeschottet werden; bei hohem Überdruck oder unbekannten Zuständen öffnet ein Sicherheitsventil, das die Kammer mit einem Zählgastank unter Umgebungsluftdruck verbindet. Der Gesamtausgang kann im Bedarfsfall mit einem Reinigungssystem verbunden werden.
Diesen Bedarfsfall festzustellen, ist eine Aufgabe des automatischen Analysesystems. Seine Position im Gaskreislauf folgt der Notwendigkeit, das Zählgas an den Ausgängen der einzelnen Kammern zu messen (vgl. Abb. 2.1).

2.2 Eigenschaften des Zählgases

Das Zählgas des äußeren Spurkammersystems muß einer Reihe von Anforderungen genügen:

· ein gutes Ionisationsverhalten, um viele Primär- und Lawinenelektronen zu erhalten,
· das Ermöglichen hoher Driftgeschwindigkeiten, um das Gas nach 96 ns wieder in den Ausgangszustand zurückzuversetzen,
· ein gutes Absorptionsverhalten für Photonen (Quenchen), die als störendes Nebenprodukt bei der Gasionisation entstehen,
· keinen Gehalt an Kohlenwasserstoffen, da diese unstabil sind,
· Ungiftigkeit und Unbrennbarkeit aus Sicherheitsgründen,
· einen akzeptablen Preis.

Das folgende Gasgemisch erfüllt diese Bedingungen [4, 5, 6]:

Gas	chem. Formel	Anteil [%]
Argon	Ar	$65 \pm 0,7$
Tetrafluormethan	CF_4	$30 \pm 0,6$
Kohlendioxid	CO_2	$5 \pm 0,3$

Tabelle 2.1: Die Komponenten des Zählgases

2.2.1 Gasionisation

Die maßgebende Wechselwirkung hochenergetischer Teilchen mit Gasen ist die Ionisation. Der mittlere Energieverlust dE auf einer Wegstrecke dx ist nach Bethe und Bloch [7]:

$$-\frac{dE}{dx} = 4\pi N_A r_e^2 m_e c^2 z^2 \frac{Z}{A}\frac{1}{\beta^2}\left[\ln\left(\frac{2m_e c^2\gamma^2\beta^2}{I}\right) - \beta^2 - \frac{\delta}{2}\right], \tag{2.1}$$

mit

z	:	Ladung des einfallenden Teilchens,
Z, A	:	Kernladungs- und Massenzahl des Absorbers,
m_e, r_e	:	Elektronenmasse und klassischer Elektronenradius,
N_A	:	Avogadrokonstante,
I	:	eine materialabhängige Ionisationskonstante,
δ	:	ein Parameter, der die Abschirmung des durch die einfallenden Teilchen erzeugten elektrischen Feldes durch die Atomelektronen berücksichtigt. Der Energieverlust reduziert sich durch diesen Effekt.

Gas	$\frac{dE}{dx}\|_{min}\ [\frac{MeV}{g/cm^2}]$
Argon	1,51
Stickstoff	1,82
Sauerstoff	1,82
Wasser	2,03

Tabelle 2.2: Mittlerer Energieverlust minimal ionisierender Teilchen in einigen Gasen unter Normaldruck [8].

In Tabelle 2.2 ist der mittlere Energieverlust in einigen Gasen aufgezeigt. Ist die gesamte Energiedifferenz in Ionisationen umgesetzt, so erhält man die Zahl der erzeugten Elektron-Ion-Paare n_T:

$$n_T = \frac{\Delta E}{W}. \tag{2.2}$$

Wobei ΔE der Energieverlust ist und W die Ionisationsenergie für ein Elektron-Ion-Paar. Es ist ferner zwischen der Zahl der insgesamt erzeugten Elektron-Ion-Paare n_T und der primären, n_P zu unterscheiden. Die primär erzeugten Paare können soviel Energie aufnehmen, daß sie wiederum ionisierend wirken.
Die Werte einiger Gase sind in Tabelle 2.3 zusammengefaßt. Der Einfluß von Stickstoff und Sauer-

Gas	$I_0[eV]$	$n_P[cm^{-1}]$	$n_T[cm^{-1}]$
Argon	15,8	29	94
Tetrafluormethan	15,9	n.b.	n.b.
Kohlendioxid	13,7	34	91
Stickstoff	15,5	10	56
Sauerstoff	12,2	22	73

Tabelle 2.3: Zusammenstellung einiger Eigenschaften von Gasen. Angegeben sind das mittlere effektive Ionisationspotential pro Hüllenelektron I_0, die Anzahl der primär (n_P) und insgesamt (n_T) gebildeten Elektron-Ion-Paare pro cm bei Normaldruck für minimalionisierende Teilchen [9, 10, 11].

stoff stellt sich also in einer Verminderung der Elektron-Ion-Paare dar.

2.2.2 Driftgeschwindigkeit

Die durch Ionisation freigesetzten Ionen und Elektronen nehmen schnell die thermische Energieverteilung des Zählgases an. Bei Raumtemperatur entspricht das typisch 40 meV. Durch Anwesenheit eines elektrischen Feldes wird der ungeordneten Diffusionsbewegung eine Driftbewegung entlang der Feldlinien überlagert. Bei einem Driftzellendurchmesser von $10\,mm$ und der Forderung nach maximalen $75\,ns$ Driftzeit – herrührend aus den $96\,ns$ des Bunchabstandes minus $21\,ns$ Detektorregenerierungszeit – ergibt sich ein Minimum für die Driftgeschwindigkeit v_{Drift} von ca. $7\,cm/\mu s$. Eine ausreichend hohe Driftgeschwindigkeit bei einer Hochspannung zwischen Anoden und Kathoden von 1950 V gewährleistet der 30%ige CF_4-Anteil im Zählgas. Er muß stabil bleiben und bei Abweichung korrigiert werden.

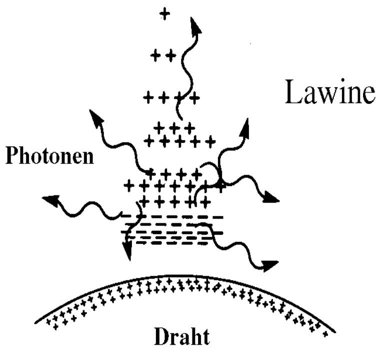

Abbildung 2.2: Ladunglawine vor dem Anodendraht einer Driftzelle. Als Nebenprodukt entstehen auch UV-Photonen.

2.2.3 Gasverstärkung

Im Bereich hoher Feldstärken kann ein Driftelektron zwischen zwei Stößen soviel Energie aufnehmen, daß es ebenfalls Gasmoleküle und -atome ionisiert. Diese Feldstärken im Bereich ab etwa 50 kV/cm werden in zylindrischen Driftzellen durch die 1/r-Abhängigkeit des elektrischen Feldes vom Anodendrahtabstand erzeugt. Bei den äußeren Spurkammern ermöglicht ein Drahtdurchmesser von 25 μm und ein Arbeitspunkt der Hochspannung von 1950 V diese Feldstärken ab einem Abstand von ca. 65 μm vom Draht [4].
Die neu entstandenden freien Elektronen ionisieren ihrerseits, was zu einer lawinenarteigen Vermehrung von Driftelektronen führt (siehe auch Abb. 2.2).
Elektronegative Gase – z.B. Sauerstoff – fangen Driftelektronen auf und mindern damit die Gasverstärkung, was die Effizienz der Kammern senkt [9]. Aus Erfahrungen anderer Experimente mit Driftkammerdetektoren geht ein typischer Anteil von 100 ppm Sauerstoff hervor, der im Zählgas nicht überschritten werden sollte[12].

2.2.4 Quenchen

Bei den Prozessen der Ionisation entstehen Photonen. Ein Teil von ihnen kann energiereich genung sein, um außerhalb der der Lawinenzone erneut Primaärelektronen frei zu setzen (siehe Abb. 2.3). Zusätzliche Pulse indes senken die Effizienz der Driftzelle [13].
Die Präsenz eines sogenannten Löschgases, hier 5% CO_2, kann diesen Effekt durch Absorption der Photonen verhindern.

2.3 Störeffekte

Einen hermetisch von der Außenwelt abgeschlossenen Gaskreislauf kann es in der Praxis nicht geben. Das gesamte Gassystem inklusive Driftkammern besteht aus einer Vielzahl von Verklebungen, Rohrverschraubungen und Dichtungen, an denen Lecks das Eindringen von Luft erlauben können. Die verwendeten Kunststoffe können ausgasen sowie aufgenommenes Wasser an das Zählgas abgeben (beides einmalige Effekte).
Die Reinheit der einzelnen Gaskomponenten bestimmt ebenfalls die des Zählgases. Von den Herstellern werden folgende Reinheitsgrade angeboten: Ar 99,9998%, CF_4 99,997%, CO_2 99,95%. Das führt zu einer Zählgasreinheit von höchstens 99,996%, was einem Verunreinigungsanteil von 40 ppm

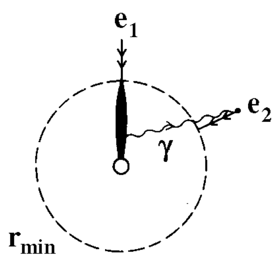

Abbildung 2.3: Kann ein Photon aus der Ladungslawine – erzeugt vom Signalelektron e_1 – ein zweites Elektron e_2 außerhalb des lawinenkritischen Radius' r_{min} freisetzen, so entsteht eine unerwünschte zweite Lawine.

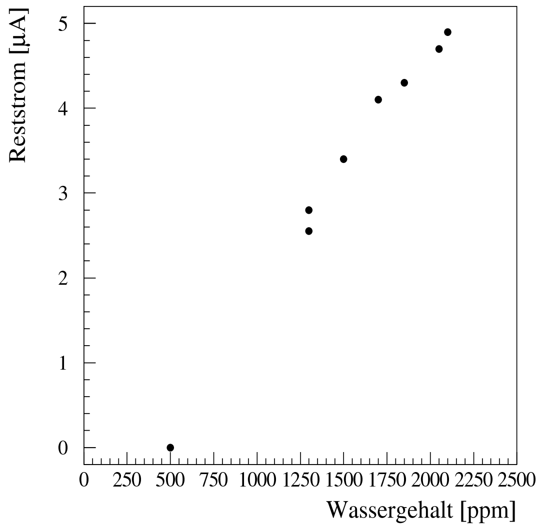

Abbildung 2.4: Reststrom zwischen Zähldraht und Driftzelle in Abhängigkeit der Wassermenge im Zählgas [14].

gleichkommt. Er teilt sich auf in O_2, N_2, He sowie C_xF_x- und C_xH_x-Verbindungen als Rückstände aus den Gewinnungsprozessen für die Gaskomponenten.
Ein Stickstoffgehalt im Zählgas verschlechtert dessen Eigenschaften. Ein Erfahrungswert für eine obere Grenze des N_2-Anteils ist 0,1% (1000 ppm) [12].

2.3.1 Wasser

Die Anlagerung von Wasser auf den Isolatoren zwischen Anode und Kathode verursacht einen Kurzschluß, der zu einem Strom, dem sog. Restrom führt. Dieser fördert die Kammeralterung.
Abbildung 2.4 zeigt den Zusammenhang von Reststrom und Wassergehalt im Zählgas. Dabei wurde eine nichtbestrahlte Testkammer mit wasserenthaltendem Zählgas gefüllt (regelbar durch ein künstliches Leck), und der Strom zwischen den Elektroden gemessen [14].
Aus dieser Messung geht ein Grenzwert von 500 ppm Wasser hervor, um keinen Reststrom mehr zuzulassen.

2.3.2 Sonstiges

Das Kohlendioxid der Luft (typisch 350 ppm) fällt gegenüber den verwendeten 5% CO_2 im Zählgas nicht ins Gewicht. Das gleiche gilt für die weiteren Spurbestandteile Helium, Wasserstoff, Argon und Kohlenmonoxid.

Durch ein unterschiedliches Diffusionsverhalten durch die Kammerabdeckungen und Leitungsmaterealien (Edelstahl) der Zählgaskomponenten könnte sich außerdem das Mischverhältnis ändern. Der Erfahrung aus anderen Experimenten nach, sind diese Effekte beim Betrieb der äußeren Spurkammern nicht zu erwarten.

Kapitel 3

Aufbau der Analyseanlage

In diesem Kapitel wird auf der Grundlage der theoretischen Vorüberlegungen aus Kapitel 2 das automatische Gasanalysesystem entwickelt.

In den Tabellen 2.1 und 3.1 sind die zu detektierenden Gastypen zusammengefaßt. Das automatische Analysesystem (Abb. 3.1) muß in der Lage sein, das Mischungsverhältnis und den Grad der Verunreinigungen an den Ausgängen jeder der 26 Driftkammerlagen und der gemeinsamen Zugangsleitung hinreichend genau zu messen. Die Messungen müssen außerdem kontinuierlich erfolgen. Unerwünschte Gase reichern sich in einem geschlossenen Kreislauf unterhalb eines Grenzwertes an. Fälle, in denen ein Grenzwert erreicht wird, sind so in einem gewissen Zeitraum vorhersehbar. Plötzliche Veränderungen (z.B. durch Unfälle) werden ebenfalls schnell bemerkt und veranlassen die Schichtbesatzung des Experiments oder die Mitarbeiter des Gassystems zu Gegenmaßnahmen (z.B. Auswechseln der Gasreiniger, Abschalten des Gaskreislaufes).
Mit dieser Bauweise bietet das System weiterhin den Vorteil, einzelne Kammern als Störursache zu identifizieren und aus dem Gaskreislauf auszukoppeln. Die Datennahme des gesamten äußeren Spurkammersystems müsste nicht beendet werden.

3.1 Der mechanische Aufbau

Die Ausgänge der Driftkammern sind über etwa 60 Meter langen Edelstahlschläuchen mit der Verteilerstation verbunden. Bevor sie zusammengefaßt werden, wird ihr Fluß mit mechanischen Flußmessern ermittelt (siehe Abb. 3.2). Die Flußmesser bestehen aus einem senkrechten, skalierten Glasröhrchen, in denen eine Kugel je nach Durchflußgeschwindigkeit in einer Höhe gehalten wird. Durch ein Nadelventil ist der Fluß auch regulierbar. Nur vor den mechanischen Flußreglern ist die Abnahme zum Analysesystem möglich. Aus den Abzweigungen wird mittels dreier Multi-

Gas	Grenzwert [ppm]
N_2	1000
O_2	100
H_2O	500

Tabelle 3.1: Obere Grenzwerte der störenden Gastypen im Zählgas des äußeren Spurkammersystems.

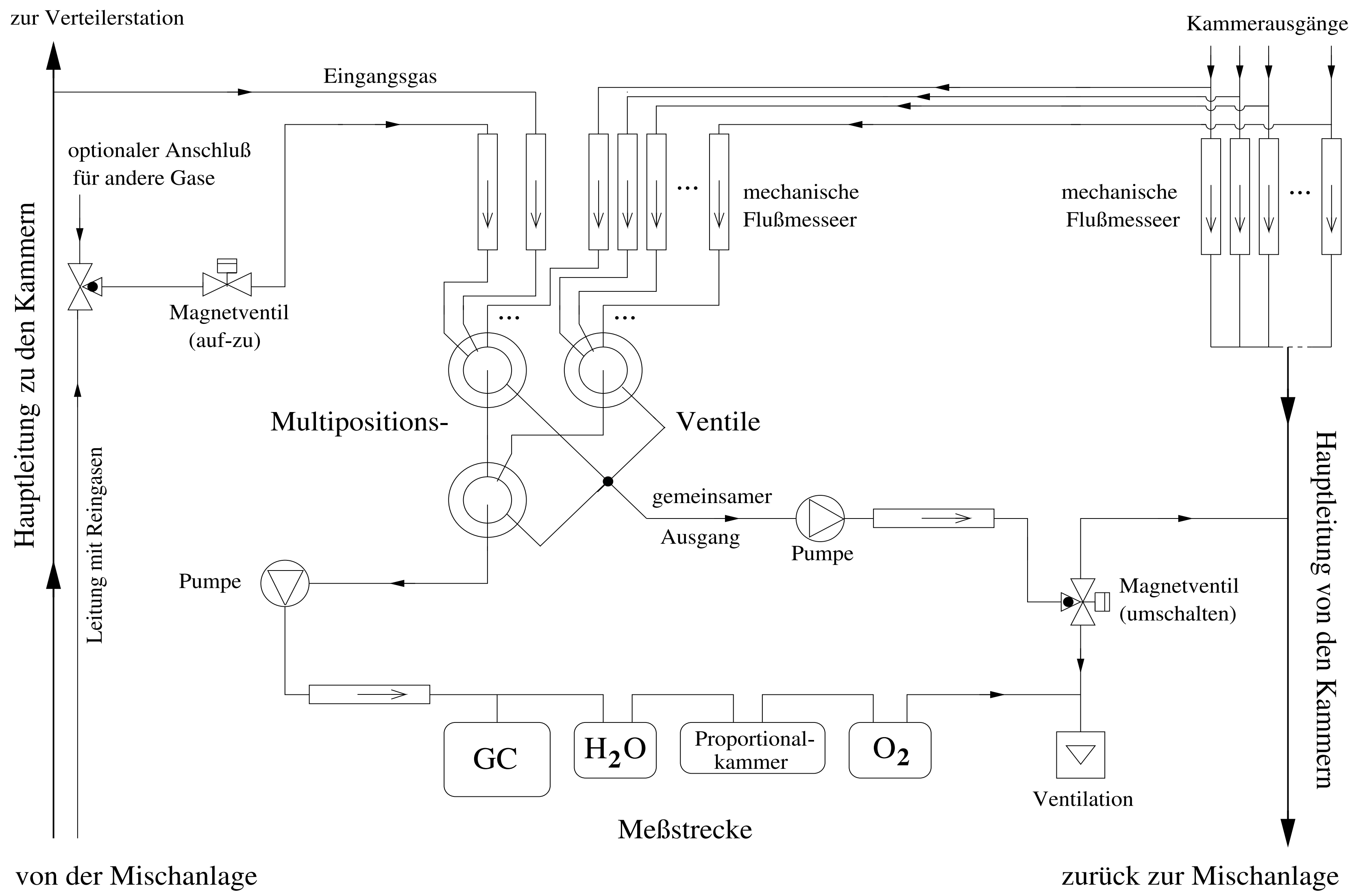

Abbildung 3.1: Plan der Analyseanlage.

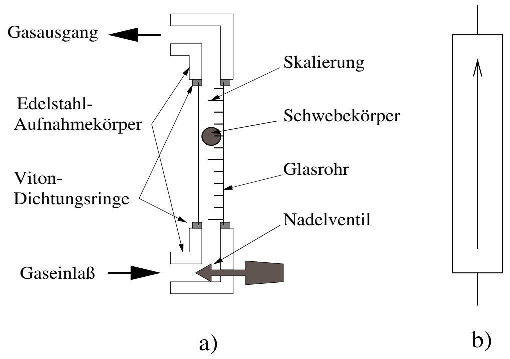

Abbildung 3.2: a) Schema eines mechanischen Flußmessers, bzw -reglers. b)Symbol.

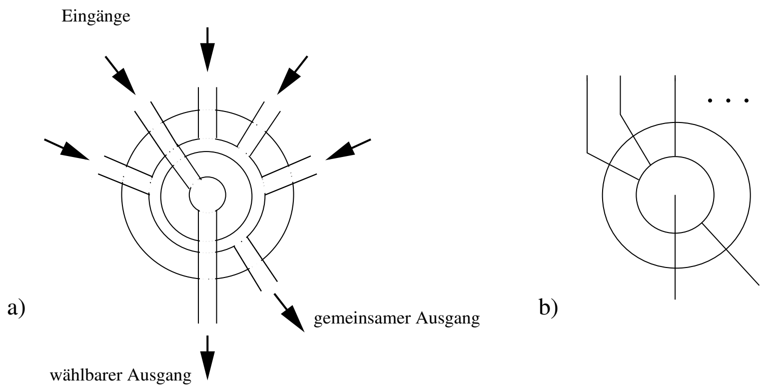

Abbildung 3.3: a)Schemazeichnung eines Multipositionsventiles. Verwendent werden zwei dieser Ventile mit je 16 Eingängen und eines mit 2 Eingängen.
b) Symbol.

positionsventile (siehe Abbildung 3.3) ein Kanal für die Messung frei geschaltet. Um die Spülzeit nach einem Schaltvorgang der Ventile möglichst kurz zu halten, wird ein ständiger Strom durch die unbenutzten Leitungen bis zu den Ventilen aufrecht erhalten. Er wird in gleicher Weise mittels mechanischer Flußmesser eingestellt und abgelesen.

Alle Multipositionsventile leiten die nicht ausgewählten Kanäle in einen gemeinsamen Ausgang weiter, an dem eine Faltenbalgpumpe kontinuierlich saugt. Eine Membranpumpe sorgt für einen Fluß vom ausgewählten Kanal in die Meßstrecke hinein. Die Funktionsweise einer Faltenbalgpumpe ist in Abbildung 3.4 zu sehen. Ein Gaschromatograph saugt mit einer eigenen Pumpe periodisch das Meßgas an. Durch ein Wassermeßgerät (Hygrometer) und eine Monitorkammer strömt das Gas kontinuierlich, sowie ein Gerät zum Nachweis von Sauerstoff. Letzteres ist am Ende der Meßstrecke vorgesehen, weil bei seinem Meßverfahren das Nebenprodukt Wasser entsteht und damit das Gas verunreinigt und für weitere Analysen unbrauchbar macht (siehe Abschnitt 3.2.3). Der Ausgang der Meßstrecke ist an die Hallenventilation angeschlossen. Aus Reinheitsgründen bestehen alle Leitungen aus Edelstahl.

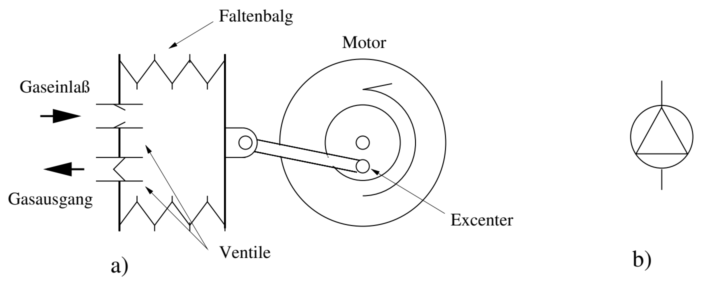

Abbildung 3.4: a) Schema einer Faltenbalgpumpe.
b) Symbol.

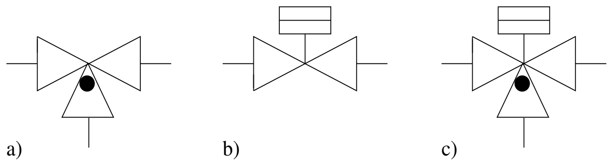

Abbildung 3.5: a) Symbol eines manuellen Zweiwege-Ventils. Der markierte Kanal kann entweder mit dem rechten oder linken Anschluß verbunden werden. In der Mittelstellung sind alle Wege verschlossen.
b) Symbol eines Auf-Zu-Magnetventiles.
c) Symbol eines Umschalt-Magnetventiles.

3.2 Die Meßinstrumente

Den Großteil der zu messenden Gase erkennt ein Gaschromatograph. Die Notwendigkeit, die Zählgaskomponenten Argon, CF_4 und CO_2 analysieren zu können, führt zu einer Gerätekonfiguration, die andere auftretende Gastypen nicht erkennbar macht (Säulentypus, siehe folgenden Abschnitt und Kapitel 4). Stickstoff ist zusätzlich meßbar. Für Sauerstoff und Wasser finden handelsübliche Nachweisgeräte Verwendung. Es ist einzig darauf zu achten, daß sie resistent gegenüber CF_4 sind und durch den Gehalt an CO_2 im Zählgas nicht gestört werden. Eine Proportionalkammer soll die Gasverstärkung direkt messen.

3.2.1 Der Gaschromatograph (GC)

Der Nachweis verschiedener Gassorten erfolgt bei einem Gaschromatographen durch das Verfahren der Gastrennung in sogenannten „gepackten Säulen“ (siehe Abb. 3.7). Dabei wird eine Menge von typischerweise $100\,nl$ des zu testenden Gasgemisches in ein $10\,m$ langes Röhrchen (die Säule) mit einem Durchmesser von 150 bis 200 μm geleitet, durch das ununterbrochen ein Trägergas strömt (hier Helium). In der Säule befindet sich entweder ein Füllstoff, oder eine Innenwandbeschichtung (Film). Sie üben einen Widerstand auf das durchströmende Gas aus: Es tritt in mobiler Phase ein, geht zum Teil in die stationäre (flüssige) Phase in/auf dem Füllstoff über und löst sich wieder in die mobilen Phase. Der Widerstand und damit die Driftgeschwindigkeit hängt von verschiedenen physikalischen Eigenschaften des Gases ab, so daß bei richtiger Einstellung aller Parameter – wie vor allem die Säulentemperatur – die Gaskomponenten hintereinander, getrennt die Säule verlassen. Am Säulenausgang befindet sich ein Sensor, der die Wärmeleitfähigkeit des Gases mit dem Trägergas Helium vergleicht. Hierzu wird eine Referenzsäule gleicher Bauart nur mit dem Trägergas

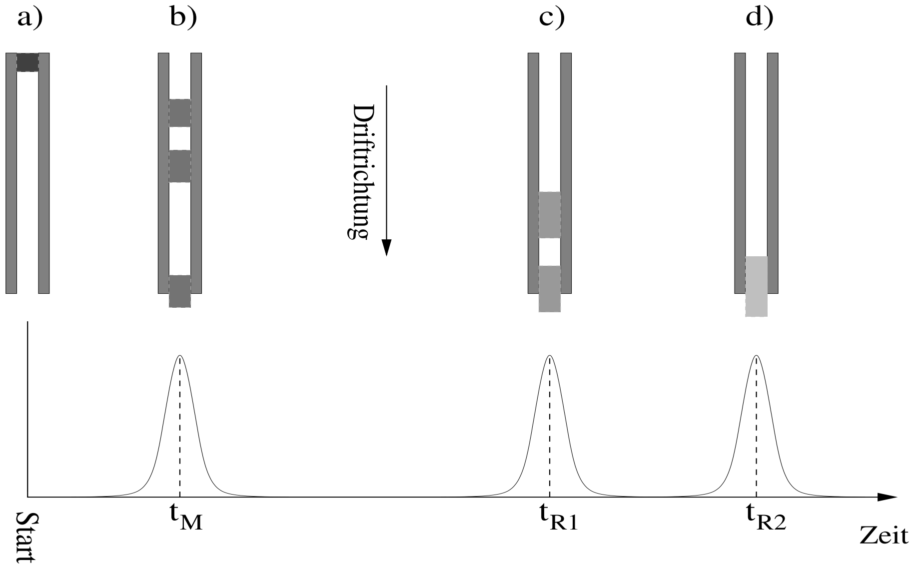

Abbildung 3.6: Das Prinzip der Trennsäulen. Zu Beginn der Meßung tritt das Gasgemisch in die Säule (a), das schnellste Gas gelangt als erstes hindurch (b), während die weiteren Komponenten stärker zurückgehalten werden (c,d).

betrieben.
Im Sensor streicht das Gasgemisch über ein thermisches Element. Die aufgenommene Wärme wird an einem darauffolgenden Punkt mittels eines thermischen Widerstandes gemessen. Ein PID-Regler versucht nun, die Temperatur des Gasgemisches immer auf einem gleichen Niveau zu halten. Das hat zur Folge, daß das thermische Element je nach Gastyp mehr oder weniger Leistung an seine Umgebung abgeben muß, als sein Pendant an der Referenzsäule.
Die Messung beginnt mit dem Ansaugen der Gasprobe in eine Leitungsschleife. Schaltet ein Ventil diese Leitungsschleife mit der Säule zusammen, fängt der Driftprozess an, und eine interne Uhr (des Rechners mit dem Meßprogramm) wird gestartet. Der Unterschied in der Leistung des thermischen Elementes im Detektor am Ende der Säule über die Zeit führt zu einem Ausschlag (den *Peak*, siehe Abb. 3.6). Die Erscheinungs- oder *Retentions*zeit hängt vom Gastyp ab, die Peakfläche, -breite und -höhe von der Gasmenge.
Der in der Analyseanlage verwendete Chromatograph ist ein Mikro-GC von der Größe eines PCs. Er beinhaltet zwei Säulenpaare aus jeweils einer Meß- und einer Referenzsäule identischer Bauart. Die rückhaltende Wirkung des Füllstoffes in den **Molsiebsäulen** bezieht sich auf die Molekülgröße. Je kleiner das Molekül ist, desto schneller die Driftgeschwindigkeit. Die ebenfalls 10 Meter langen **Pora-Plot-U-Säulen** (*porous-layer open-tubular*-Säulen vom firmeneigenem Typ U, kurz PPU) üben einen Widerstand in Abhängigkeit der Polarität auf ein Gas aus.
Die Säulen befinden sich in aufgewickeltem Zustand in einem Ofen, der eine Temperatur von 30 bis $180°C$ mit einer Genauigkeit von $1°C$ einstellt. Die Aufnahmefrequenz eines Chromatogramms beträgt 25 Hz. Somit liegt der systematische Fehler der Zeitmessung bei $(0,04/\sqrt{12})\ s$.
Bis auf die Säulendruckregelung lassen sich alle Meßparameter über das Steuerungsprogramm setzen (siehe Abschnitt 3.3.1). Typische Meßzeiten sind $120\,s$ (maximal $255\,s$ möglich). In einer Meßsequenz kommt eine Wartezeit von ca. 8 Minuten zwischen zwei Messungen hinzu, in der die Messstrecke mit dem als nächstes zu kontrollierenden Gas bei einem Gasfluß von 5 bis 8 l/min gespült wird. Die Messung aller Kammerausgänge sowie des Eingangsgases dauert damit 27×10

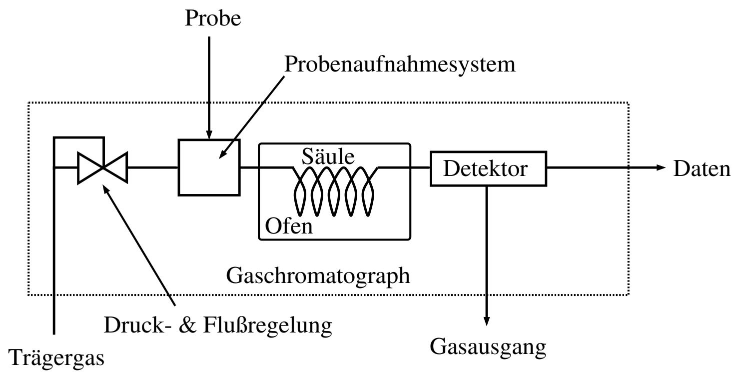

Abbildung 3.7: Vereinfachtes Schema des inneren Aufbaues des GCs.

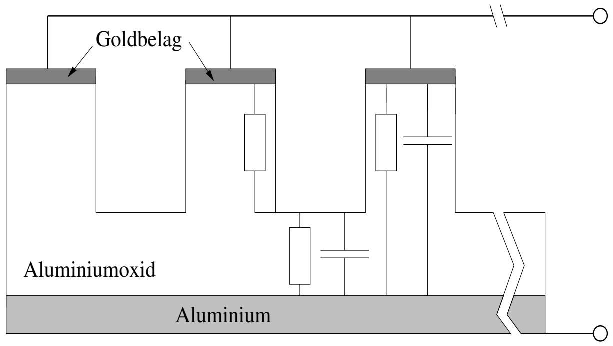

Abbildung 3.8: Schnitt durch den Meßkondensator mit der Ersatzschaltung einer Pore [16].

Minuten und kann mehrmals pro Tag wiederholt werden. Die Drücke der Säulen liegen zwischen 140 und 200 kPa [15].

3.2.2 Das Hygrometer

Das Hygrometer dient des Messung des Wassergehaltes im Zählgas. Sein Meßsensor besteht aus einem Kondensator mit einer porösen Aluminiumverbindung als Dielektrikum (siehe Abb. 3.8). In ihm können sich Wassermoleküle anlagern und damit die Kapazität des Kondensators verändern.
Der Kondensator befindet sich in einem Edelstahlzylinder, durch den das zu messende Gas strömt (Volumen ca. 15 cm^3, siehe Abb. 3.9). Ermittelt wird der Wassergehalt in Form des Taupunktes in $°C$. Er gibt die Temperatur an, bei der der Wassergehalt eines Gasgemisches in die Sättigung tritt und auskondensiert.
Den Wassergehalt ϑ ppm erhält man mittels einer Umrechnungstabelle [16]. Das Auslesegerät besitzt einen analogen Ausgang von 4 bis 20 mA. In Abbildung 3.10 ist die Umrechnungstabelle von Taupunkt zu Wassergehalt aufgetragen [16].

3.2.3 Das Sauerstoffmeßgerät

In einer Brennstoffzelle wird Wasserstoff mit Sauerstoff zu Wasser oxidiert. Dieser Prozeß findet schrittweise an zwei Elektroden statt, zwischen denen unter Ausnutzung fast der gesamten freien

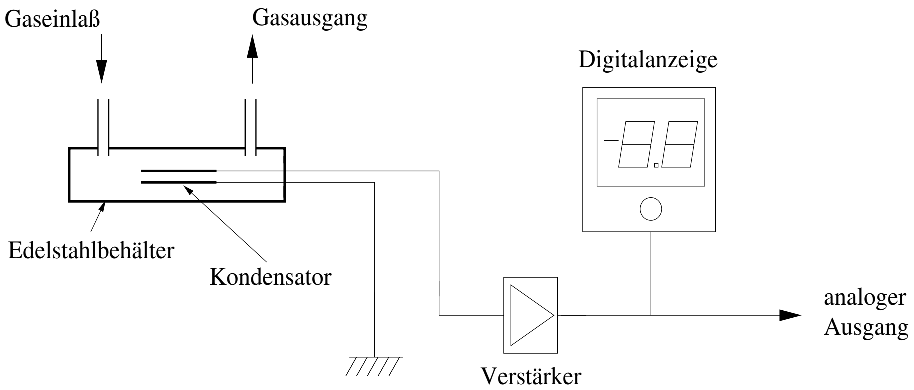

Abbildung 3.9: Schemazeichnung des Hygrometers.

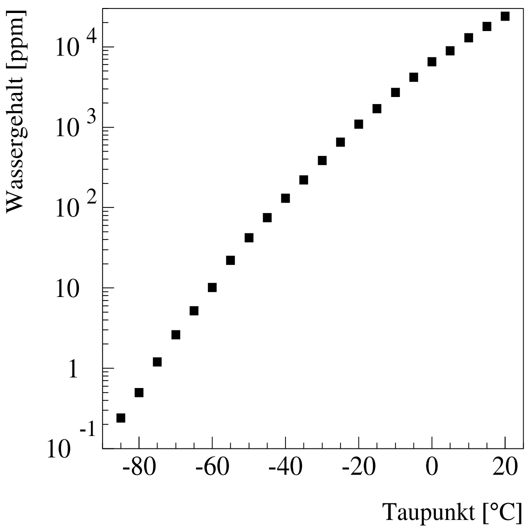

Abbildung 3.10: Wassergehalt eines Gasgemisches in Abängigkeit des Taupunktes (einer Umrechnungstabelle entnommen [16]).

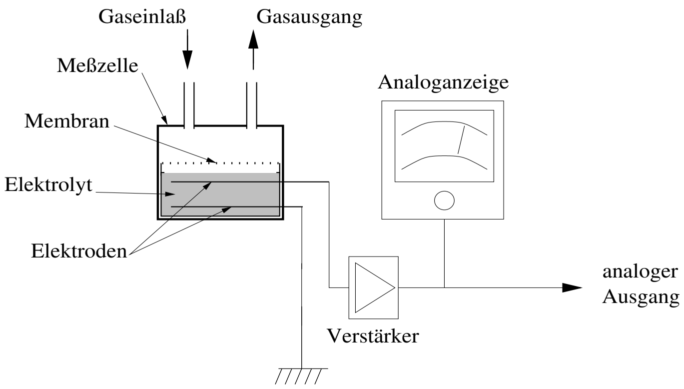

Abbildung 3.11: Schema des Sauerstoffmeßgerätes.

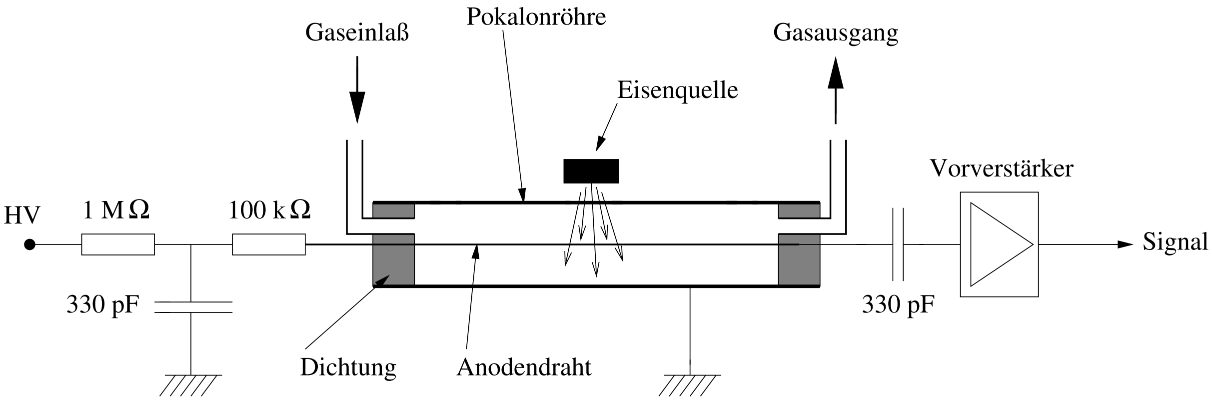

Abbildung 3.12: Schemazeichnung der Proportionalkammer.

Enthalpieänderung ΔG ein Strom fließt:

$$H_2 + 2\,OH^- \longrightarrow 2\,H_2O + 2\,e^- \quad \text{(Anode)} \tag{3.1}$$

$$\frac{1}{2}\,O_2 + H_2O \longrightarrow 2\,OH^- - 2\,e^- \quad \text{(Kathode)} \tag{3.2}$$

Die Bedingungen dafür schafft ein alkalisches Elektrolyt, das sowohl den Wasserstoff liefert, als auch das Wandern der OH^--Ionen von der Kathode zur Anode und des Wassers in umgekehrter Richtung erlaubt [17].
Abbildung 3.11 zeigt den Aufbau des Sauerstoffmeßgerätes. In einem Meßbehälter von ca. 30 cm^3 Inhalt befindet sich das zu messende Gasgemisch über der Brennstoffzelle. Der Sauerstoffanteil bestimmt die Reaktionsrate und damit den erzeugten Strom [18]. Das Gerät verfügt über einen analogen Ausgang von 0 bis 20 mV.

3.2.4 Die Proportionalkammer

Der γ-Strahler ^{55}Fe erzeugt bei einer Energie von 4,9 keV Spannungspulse in einer einzelnen Driftröhre. Die gemessene Spannung ist dabei proportional zur Anzahl der Primärelektronen. Abbildung 3.12 zeigt den Längsschnitt mit Hochspannungsanschluß und Ausleseelektronik. Anstatt einzelner Pulse wird das Energiespektrum der Quelle (gaußverteilt um 4,9 keV) in Abhängigkeit

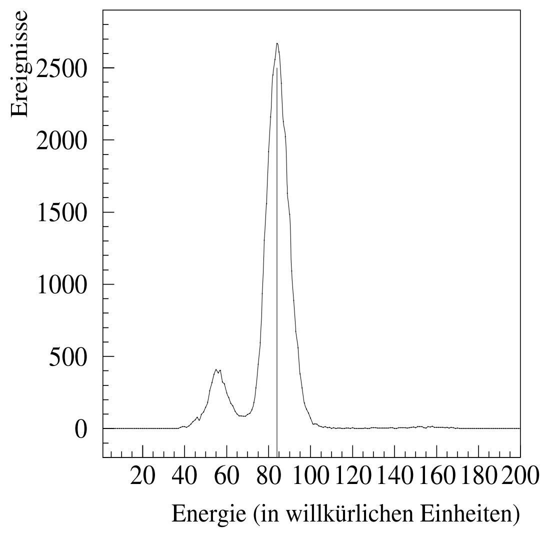

Abbildung 3.13: Beispiel eines Energiespektrums einer Eisenquelle, aufgenommen mit der Proportionalkammer. Das Spektrumsmaximum von 4,9 keV befindet sich auf dieser Energieskala beim Wert 84. Deutlich ist der „Escape-Peak“ vor dem Hauptpeak zu erkennen.

der Gasqualität ermittelt. In einem Histogramm werden die aufgenommenen Einzelpulse ihrer Ladungsmenge nach aufgetragen. Abbildung 3.13 zeigt dieses Energiespektrum in reinem Zählgas. Verunreinigungen im Zählgas verursachen eine Minderung der Gasverstärkung. So nimmt Sauerstoff beispielsweise driftende Elektronen auf. Die Pulse verkleinern sich in der Folge, und das Spektrum wandert in Regionen niedrigerer Energie. Aus Kammertests geht ein Erfahrungswert für eine tolerierbare Veränderung der Spektrumsposition von 10% hervor [14].

3.3 Der Software-Flußplan

Die Meßdaten der einzelnen Geräte bilden einen Teil der Historie der äußeren Spurkammern, weil sie gespeichert bei der Fehlersuche nach Kammerausfällen helfen und die Einschätzung der Effizienz der Detektoren im Nachhinein erlauben. Aktuell angezeigt spiegeln sie den Zustand des Gaskreislaufes wieder.
Die einzelnen Datenteile müssen also gebündelt, weiterverarbeitet und an das langsame Kontrollsystem „Slow Control“, das auch andere Parameter aller Detektorkomponenten aufnimmt, weitergegeben werden. Abbildung 3.14 zeigt eine Übersicht über die Datenwege von den Instrumenten bis zu Slow Control.

3.3.1 Maitre und Valvecontrol

Über Maitre werden alle Meßparameter bis auf den Säulendruck, der nur manuell am GC justierbar ist, eingestellt. Es können nicht nur einzelne Chromatogramme, sondern eine vorher festgelegte Reihe von bis zu 750 Messungen aufgenommen werden. Am Ende jeweils eines Chromatogrammes wird es automatisch ausgewertet. Hierfür werden vorher festgelegte Variablen herangezogen, die einen Peak definieren (z.B. Schwellenwert über der Chromatogramm-Grundlinie) und die einem Peak den Gastyp und die Gasmenge zuordnen. Für letzteren Schritt ist mindestens eine Kalibrati-

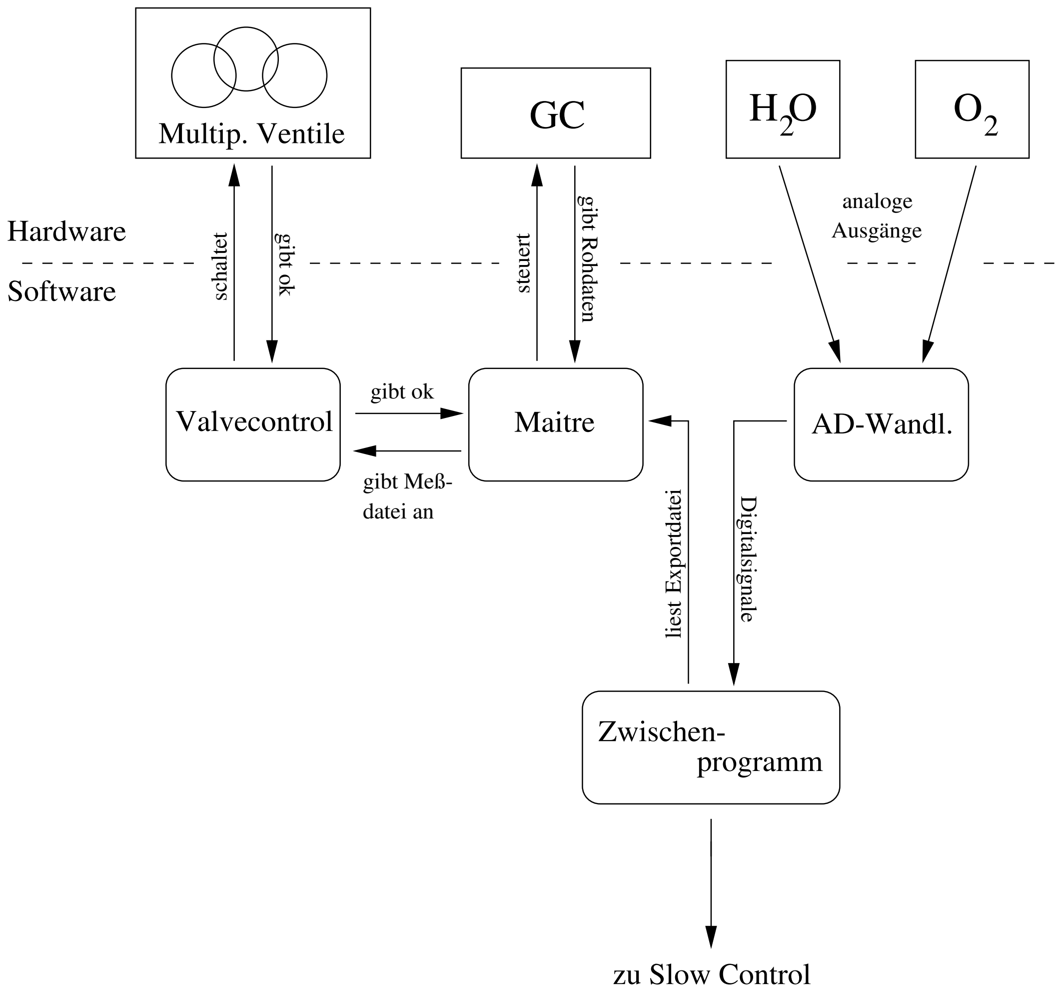

Abbildung 3.14: Die Datenwege von den Hardwarekomponenten bis zu Slow Control. Die Proportionalkammer wird über eine separate Software ausgelesen und zeitlich erst bei Slow Control auf die anderen Daten abgestimmt.

on notwendig. Das Programm Maitre ist außerdem in der Lage, das Analyseergebnis in Form einer ASCII-Tabelle zu exportieren.
Valvecontrol dient nun der automatischen Steuerung der Multipositionsventile auf der Basis der Meßreihe von Maitre. Zu Beginn einer Messung legt Maitre eine Datei an, die nur das rohe Chromatogramm enthalten wird. Endet diese Datei mit mit `.xyz`, wobei `xyz` eine Zahl von 001 bis 750 darstellt, so vergleicht Valvecontrol diese Endung mit den dazugehörigen Ventilpositionen in einer eigenen Tabelle und schalten die Ventile dorthin.

3.3.2 Das Zwischenprogramm

Maitre und Valvecontrol bilden die Grundlage für eine periodisch sich wiederholende Meßsequenz. Parallel dazu müssen die analogen Instrumente zu geeigneten Zeitpunkten ausgelesen werden. Hierzu ist ein Programm zwischen den Meßinstrumenten und Slow Control nötig. Es schreibt aus der Exporttabelle von Maitre und den analogen Daten einen Datensatz und sendet ihn weiter.

Kapitel 4

Das Einrichten der Anlage

Die in Kapitel 3 eingeführten Meßinstrumente müssen vor Inbetriebnahme auf ihre Funktionstüchtigkeit überprüft werden. Diese Verfahren – in diesem Kapitel vorgestellt – bestehen aus Kalibrationen und Testmessungen. Für den Gaschromatograph müssen zunächst die Arbeitspunkte der beiden Säulen (Molsiebsäule und PPU-Säule) festgelegt werden, bevor die Kalibrationen auf die Gastype Ar, CF_4, CO_2 und N_2 erfolgt.

4.1 Der Gaschromatograph

4.1.1 Die Arbeitspunkte

Um die Retentionszeiten der Zählgaskomponenten zu ermitteln, werden die Komponenten separat bei variierender Temperatur gemessen. Sauerstoff und Stickstoff erhält man einfach aus der Umgebungsluft. Ziel ist es, die Retentionszeiten der Gase am Arbeitspunkt möglichst weit auseinander zu halten, so daß die Peaks zu trennen sind.
Abbildung 4.1 und 4.2 zeigen zwei typische Probleme in der Gaschromatographie. Zum einen einen sehr breiten Peak (CF_4), der aufgrund seiner Asymmetrie und seiner Breite nicht mehr analysiert werden kann; und zum anderen einen Doppelpeak, enstanden bei einer Messung mit ungeeigneter Temperatur. Beide Probleme sollen bei den gewählten Säulentemperaturen nicht auftreten.
Da der Säulendruck elektronisch nicht variiert werden kann, wird er konstant auf den voreingestellten Werten von

- 158 kPa (Molsiebsäule) und
- 197 kPa (PPU-Säule)

gehalten.
Die Tabellen 4.1 und 4.2 zeigen die Retentionszeiten der fünf Gastypen in Abhängigkeit der Säulentemperatur in der Molsieb- und der PPU-Säule. Die Resultate sind den Abbildungen 4.3 und 4.4 aufgetragen. CO_2 ist mit der Molsiebsäule nicht detektierbar, weil es aufgrund seiner Molekülgröße nicht hindurchdriften kann. CF_4 erscheint als sehr breiter und asymmetrischer Peak, der erst ab 140 °C Säulentemperatur vollständig im Chromatogramm erscheint und quantifizierbar wird. Die Retentionszeiten von Ar und O_2 liegen maximal 0,1 s auseinander, ihre Peaks überlagern sich vollständig. Dies hat zur Folge, daß der $O-2$-Gehalt auf anderem Weg bestimmt werden muß. Bei Temperaturen ab 140 °C überlagern auch mit Ar und N_2.
In der PPU-Säule fallen Ar, N_2 und O_2 bei allen Säulentemperaturen zusammen. Ab 80 °C überlappen die drei Gase auch mit CF_4. Die Retentionszeit von CO_2 ist bei allen Säulentemperaturen

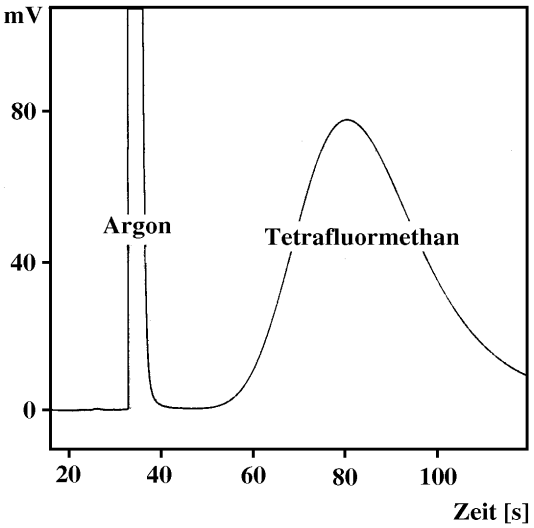

Abbildung 4.1: Chromatogramm von reinem Zählgas in der Molsiebsäule bei 100 °C. Tetrafluormethan erscheint sehr breit.

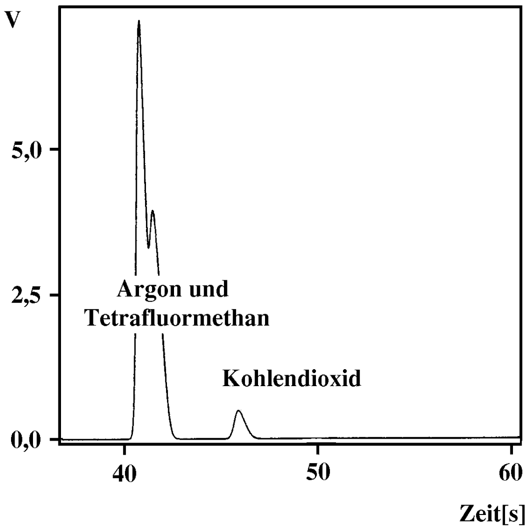

Abbildung 4.2: Chromatogramm des reinen Gasgemisches bei einer ungeeigneten Säulentemperatur (100 °C, PPU). Der entstandene Doppelpeak aus Argon und Tetrafluormethan ist nicht mehr auswertbar.

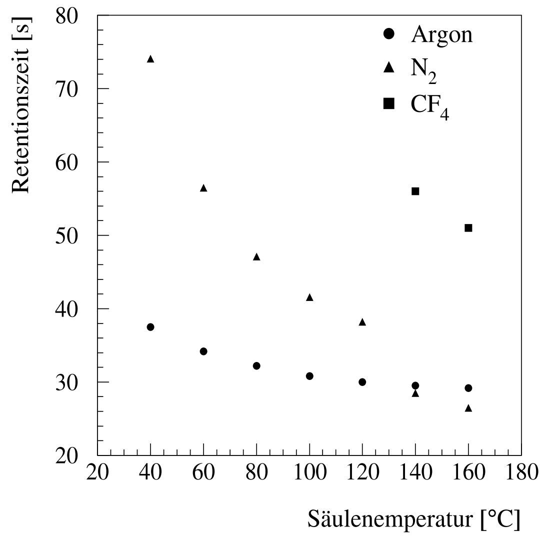

Abbildung 4.3: Retentionszeiten von Argon, Stickstoff und Tetrafluormethan in der Molsiebsäule in Abhängigkeit der Säulentemperatur.

Gas	Säulentemperatur [$°C$]						
	40	60	80	100	120	140	160
Ar	37,5	34,2	32,2	30,8	30,0	29,5	29,2
CF_4	–	–	–	–	–	56,0	51,0
CO_2	–	–	–	–	–	–	–
N_2	74,1	56,5	47,1	41,6	38,2	28,5	26,5
O_2	37,4	34,3	32,2	30,8	30,1	29,6	29,3

Tabelle 4.1: Retentionszeiten in Sekunden der fünf wichtigsten Gastypen in Abhängigkeit der Temperatur der Molsiebsäule.

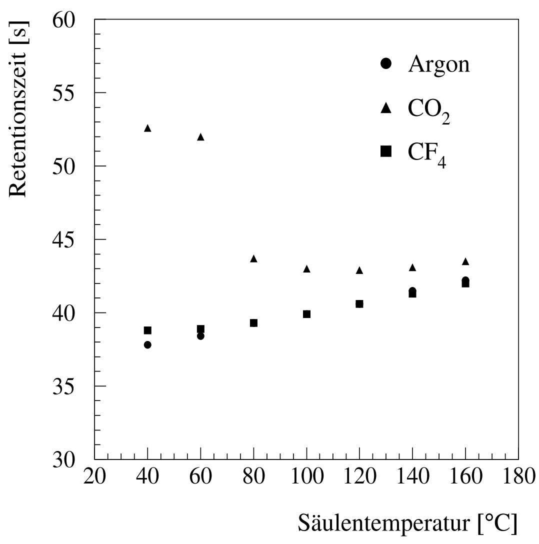

Abbildung 4.4: Retentionszeiten von Argon, Tertrafluormethan und Kohlendioxid in der PPU-Säule.

Gas	Säulentemperatur [$°C$]						
	40	60	80	100	120	140	160
Ar	37,8	38,4	39,3	39,9	40,6	41,5	42,2
CF_4	38,8	38,9	39,3	39,9	40,6	41,3	42,0
CO_2	52,6	52,0	43,7	43,0	42,9	43,1	43,5
N_2	37,5	38,3	39,0	39,6	40,4	41,2	42,0
O_2	37,5	38,3	39,0	39,6	40,4	41,2	42,0

Tabelle 4.2: Retentionszeiten in Sekunden der wichtigsten Gastypen in Abhängigkeit der Temperatur der PPU-Säule in Abhängigkeit der Säulentemperatur.

zwischen 1,3 und ca. 14 s länger als für die anderen Gase.
In der Konsequenz lassen sich die Zählgaskomponenten in der PPU-Säule bei 40 $°C$ Säulentemperatur trennen, wobei der Ar-Peak auch O_2 und N_2 enthält. Für eine vollständige Analyse müssen diese Gase herausgerechnet werden. Die Molsiebsäule trennt bei 40 $°C$ Ar und N_2. Der Ar-Peak enthält hier auch O_2. Weil Ar aber mit der PPU-Säule detektiert wird, kann die Molsiebsäule nur zur Erkennung von N_2 benutzt werden.

4.1.2 Kalibration

Abbildung 4.5 und 4.6 zeigt das Chromatogramm des Zählgases, bestehend aus (64,79 ± 1,30)% Ar, (30,1 ± 0,6)% CF_4 und (5,11 ± 0,10)% CO_2 (Kalibrationsmischung, Komplett und Ausschnitt). So soll das Chromatogramm bei störungsfreiem Kammerbetrieb aussehen. Retentionszeiten und Peakflächen werden automatisch bestimmt.

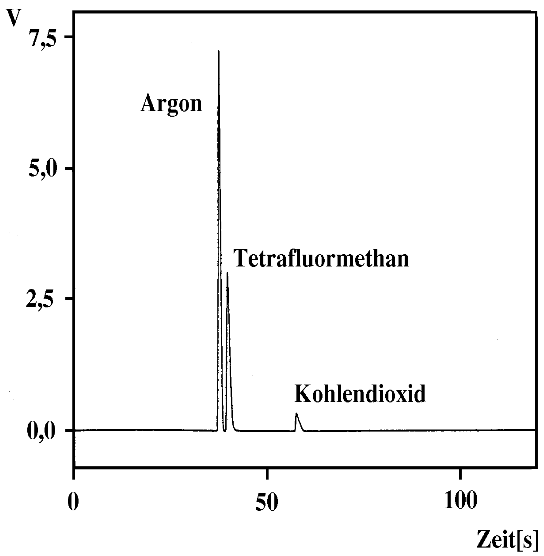

Abbildung 4.5: Das gesamte Chromatogramm des reinen Zählgases für das äußere Spurkammersystem, gemessen mit der PPU-Säule bei 40 $°C$.

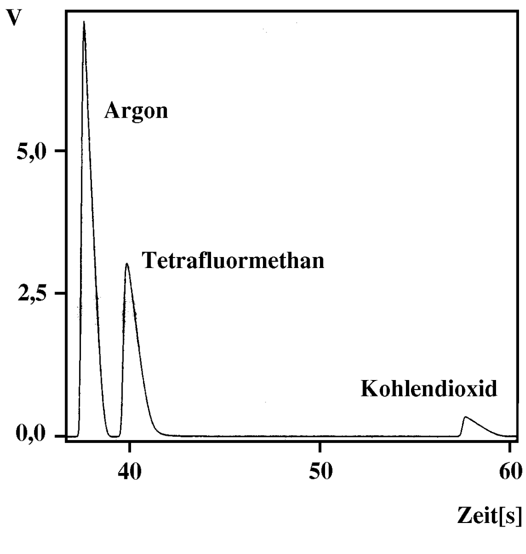

Abbildung 4.6: Ausschnitt aus dem vorstehenden Chromatogramm.

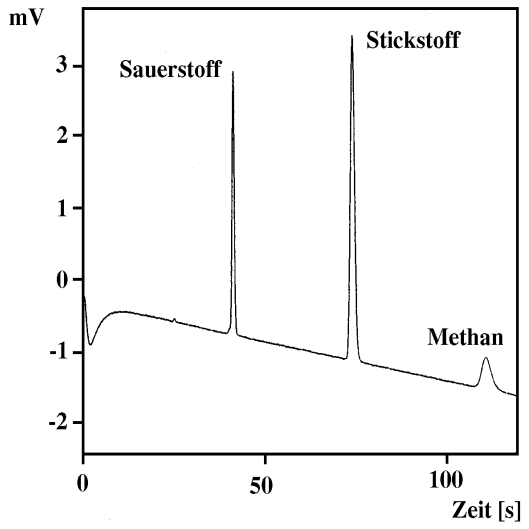

Abbildung 4.7: Chromatogramm des Kalibrationsgases in der Molsiebsäule bei 40 $°C$. Die Säule befindet sich in diesem Fall nicht im Temperaturgleichgewicht, was zu einer Grundliniendrift von ca. 1 mV in zwei Minuten führt.

Zur Kalibration auf andere Gastypen als die Zählgaskomponenten, die vorraussichtlich im Bereich von einigen hundert *ppm* auftreten werden, steht ein zweites Gasgemisch, das sog. *Kalibrationsgas*, zur Verfügen. Es besteht aus

- (207 ± 4) $ppm\ O_2$
- (197 ± 4) $ppm\ N_2$
- (220 ± 4) $ppm\ CH_4$
- (204 ± 4) $ppm\ CO_2$

in Helium. Die Abbildungen 4.7 und 4.8 zeigen die Chromatogramme dieses Kalibrationsgasen in den beiden Säulen bei 40 $°C$. Ein Chromatogramm der Molsiebsäule von leicht verunreinigtem Zählgas zeigt Abbildung 4.9. Neben dem vergleichsweise großen Ar-Peak bleibt der N_2-Peak deutlich bestehen.

4.1.3 Genauigkeit und Stabilität

Die Meßgenauigkeit der Zählgaskomponenten setzt sich aus der Qualität des Kalibrationsgases und Meßungenauigkeiten des GCs zusammen. Das Kalibrationsgas besteht aus (64,79 $\pm$ 1,30)% Ar, (30,1 $\pm$ 0,6)% CF_4 und (5,11 $\pm$ 0,10)% CO_2. Der einmal auf diese Werte geeichte GC reproduziert diese Zusammensetzung bis zu einem halben Jahr nach der ersten Kalibration weit unterhalb der Mischungenauigkeit ohne erkennbare Abweichung (siehe Tabelle 4.3). Die Ungenauigkeit der Zeitmessung des GCs soll nicht größer als 0,5 s sein, um die um 1 s beieinanderliegenden Peaks von Ar und CF_4 in der PPU-Säule separieren zu können. Der systematische Fehler von 0,01 s bleibt eine Größenordnung darunter. In Tabelle 4.4 sind alle mit dem GC detektierbaren Gastypen und ihre Meßgenauigkeit aufgelistet.

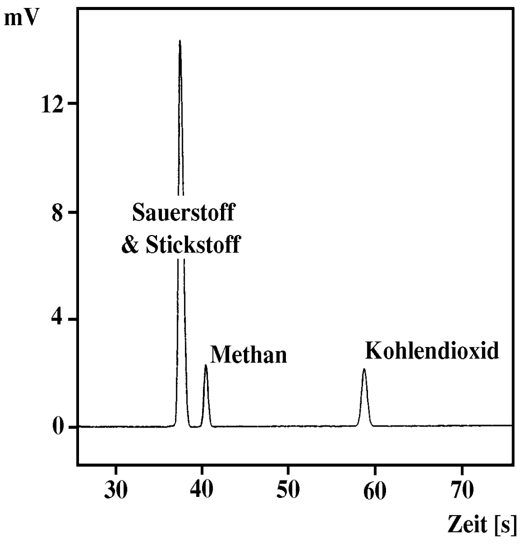

Abbildung 4.8: Chromatogramm des Kalibrationsgases in der PPU-Säule bei 40 °C.

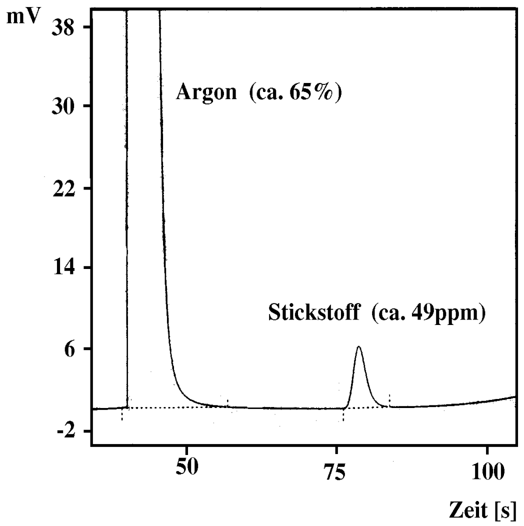

Abbildung 4.9: Ausschnitt aus einem Chromatogramm im Fall eines geringen Stickstoffanteiles im Zählgas (Molsiebsäule, 40 °C).

Zeit [Tage (Jahre)]	Argon [%]	CF_4[%]	CO_2[%]
0 (0)	64,79	30,10	5,11
21 (0,06)	64,77	30,12	5,12
85 (0,23)	68,78	30,10	5,12
177 (0,48)	68,77	30,11	5,12

Tabelle 4.3: Messungen des Kalibrationszählgases in verschiedenen Abständen zur ersten Kalibration zum relativen Zeitpunkt 0 (die Laufzeit von Hera-B beträgt vorraussichtlich sieben Jahre).

Gastyp	typischer Anteil [%]	abs. Genauigkeit [%]
Ar	65,0	1,3
CF_4	30,0	0,6
CO_2	5,0	0,1
N_2	0,0200	0,0004

Tabelle 4.4: Meßgenauigkeit für die vom GC detektierbaren Gastypen.

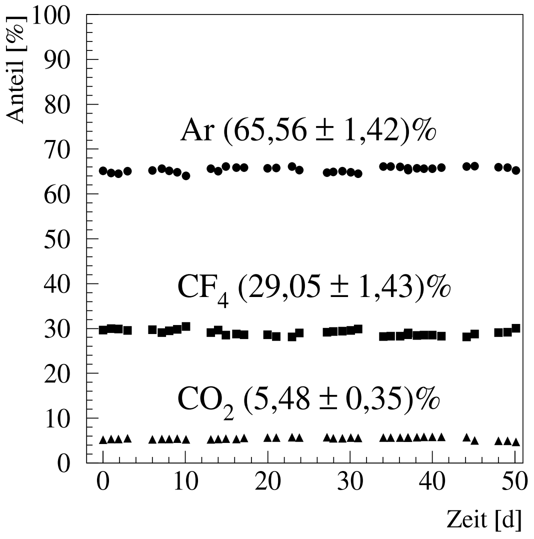

Abbildung 4.10: Stabilitäts der Gasmischanlage des äußeren Spurkammersystems über 50 Tage. Angegeben sind die Mittelwerte der Gastypen ± ihre Streuung.

4.1.4 Beispiele

Zum Nachweis der Funktionstüchtigkeit des Gaschromatographen vermißt er die Gasmischanlage des äußeren Spurkammersystems über einen Zeitraum von 50 Tagen. Als Resultat geht die folgende Gasqualität hervor (Mittelwert ± Streuung ± Meßgenauigkeit):

$$Ar : (65{,}56 \pm 1{,}42 \pm 1{,}30)\%$$
$$CF_4 : (29{,}05 \pm 1{,}43 \pm 0{,}60)\%$$
$$CO_2 : (5{,}48 \pm 0{,}35 \pm 0{,}10)\%$$

Im Rahmen der Vorgaben ist dies eine ausreichende Genauigkeit sowohl der Mischanlage, als auch des GCs. Der Stickstoffgehalt wird beispielhaft in einem Kreislauftest gemessen. Hierzu werden die bis dato vorhandenen Kammern (16 Stk.) zu einem Kreislauf zusammengeschlossen, dem 15% frisches Zählgas zugefügt werden. Zu erwarten ist ein Anstieg des Stickstoffgehaltes im Zählgas mit der Zeit. In Abbildung 4.11 ist das Ergebnis dargestellt, der Stickstoffgehaltes des Eingansgases.
Der Anteil steigt binnen 25 Stunden von 0 auf tolerierbare 550 ppm und bleibt konstant. Er kann mit der Änderung des Frischgaszusatzes variiert werden.

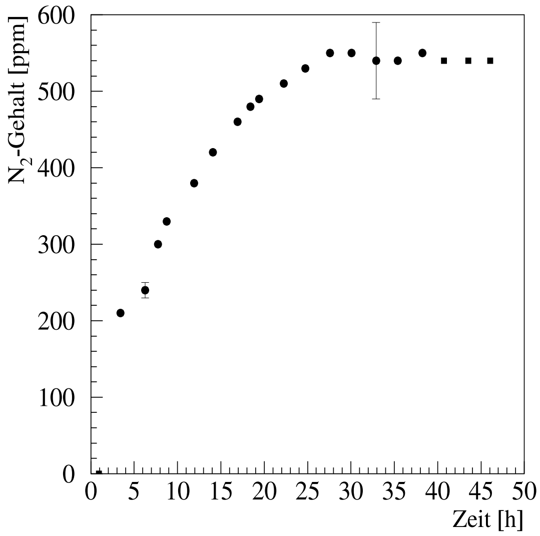

Abbildung 4.11: Stickstoffanreicherung im geschlossenen Gaskreislauf. Der Meßfehler wächst mit dem Abstand zum Kalibrationspunkt von N_2 (200 *ppm*) an, da man ein lineares Verhalten einer gepackten Säule nicht annehmen kann. Der Fehler von 10% bei 550 *ppm* beruht auf einer Schätzung.

Eichpunkte (Kalib.)[°C]	$-74,0$	$-50,0$	$-28,5$	$-10,0$	$+14,0$
Meßpunkte (Gerät)[°C]	$-72,0$	$-46,0$	$-24,5$	$-6,0$	$+14,0$

Tabelle 4.5: Fünfpunkt-Kalibrationsstabelle des Hygrometers.

4.2 Das Hygrometer

4.2.1 Kalibration

Die Kalibration des Hygrometers erfolgt über die Justierung auf den kleinst- und den größtmöglichen Temperaturwert (-80 °C,+20 °C) mittels eigener Trimmpotentiometer. Den unteren Taupunkt muß das Instrument ohne Anschluß des Sensors anzeigen, den oberen in nachweisbar mit Wasser gesättigter Luft bei +20 °C mit Sensor. Im Bereich dazwischen zeigt jeder Sensor eine eigene Charakteristik (Kennlinie), die sich anhand einer vom Werk angegebenen 5-Punkt Kalibrationskurve darstellt (siehe Tab. 4.5 und Abb. 4.13).

4.2.2 Berechnung

Aus dem Strom wird der Taupunkt ermittelt (die Korrelation dieser beiden Werte zeigt Abb. 4.12). Aus dem angezeigten Taupunkt geht durch die 5-Punkt Kalibrationskurve der „tatsächliche" Taupunkt hervor (siehe Abb. 4.13). Aus ihm wird der Wassergehalt ϑ in *ppm* berechnet.
Die Taupunkt-Strom-Gleichung lautet für den Ausgangsstrom a in mA:

$$a(T_{Gerät}[°C]) = k_0 + k_1 \cdot T_{Gerät}. \tag{4.1}$$

Die Kennlinie des Meßkondensators genügt der quadratischen Anpassung

$$T_{Gerät}(T_{kalib.}[°C]) = k_2 + k_3 \cdot T_{kalib.} - k_4 \cdot T_{kalib.}^2. \tag{4.2}$$

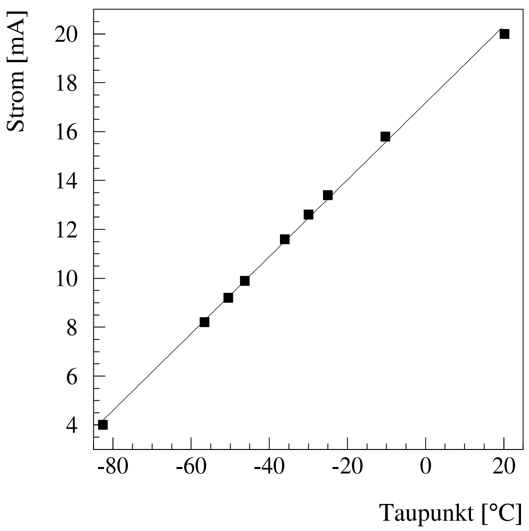

Abbildung 4.12: Ausgangsstrom des Hygrometers in Abhängigkeit des Taupunktes mit linearer Anpassung.

mit

k_0	:	$(1,5722 \pm 0,012054) \cdot 10^{-1}\ mA$
k_1	:	$(17,173 \pm 0,05399) \cdot 10^{1}\ mA/°C$
k_2	:	$(2,2977 \pm 0,062288) \cdot 10^{1}\ °C$
k_3	:	$(8,76 \pm 0,035322) \cdot 10^{-1}$
k_4	:	$(-1,7506 \pm 0,053436) \cdot 10^{-3}\ 1/°C$

Die Umkehrfunktion aus 4.1 ist in die Umkehrfunktion aus 4.2 einzusetzen und das Resultat in die Gleichung 4.3.(Herkunft dieser Gleichung: siehe Anhang A.)

$$\vartheta(T_{Tau}[K]) = \frac{m_W}{a \cdot k_B T_{Tau}} \cdot \exp(\sum_{i=0}^{4} j_i T_{Tau}^{i-2}). \tag{4.3}$$

mit

j_0	:	$(1,0 \pm 0,000876) \cdot 10^{6}\ K^2$
j_1	:	$(-4,5792 \pm 0,0053819) \cdot 10^{3}\ K$
j_2	:	$(2,6997 \pm 0,043911) \cdot 10^{1}$
j_3	:	$(-1,253 \pm 0,99273) \cdot 10^{-7}$ 1/K
j_4	:	$(3,5751 \pm 0,046913) \cdot 10^{-5}\ 1/K^2$

Durch Fehlerfortpflanzung erhält man ein $\Delta\vartheta/\vartheta$ von 13,6% rel. Für den Grenzwert des H_2O-Gehaltes im Zählgas bedeutet das eine absolute Genauigkeit von $(500 \pm 68)ppm$.

4.2.3 Beispiel

Drei neu aufgebaute Kammern werden mit Argon gespült, ohne daß das Gas zirkuliert. Zu erwarten ist, daß der Wassergehalt zu Beginn des Spülens dem der Umgebungsluft gleicht (5000 bis 10 000 *ppm*) und dann absinkt. Vor der Messung war unbekannt, ob und wie schnell das Wasser, das im Pokalonmaterial der Driftzellen gelagert ist, austritt. In Abbildung 4.15 ist die zeitliche Entwicklung

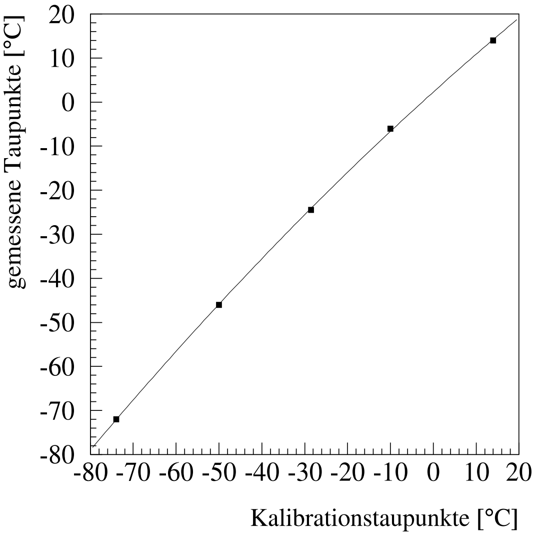

Abbildung 4.13: Kalibrationskurve des Hygrometers mit einer Anpassung zweiter Ordnung. Aufgetragen ist der vom Hygrometer gemessene Taupunkt über fünf Kalibrationspunkten.

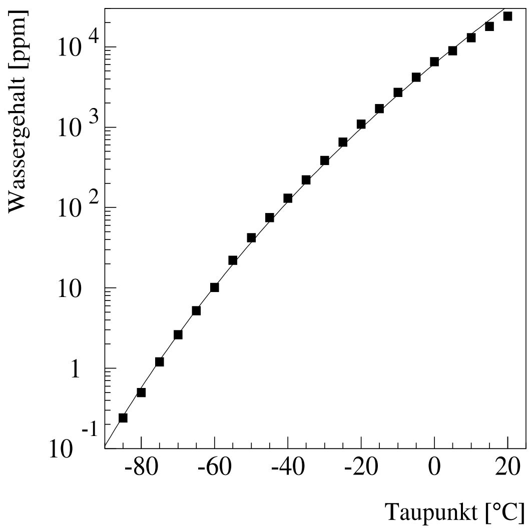

Abbildung 4.14: Der Wassergehalt in *ppm* aufgetragen über den Taupunkt mit der Anpassung Gleichung 4.3.

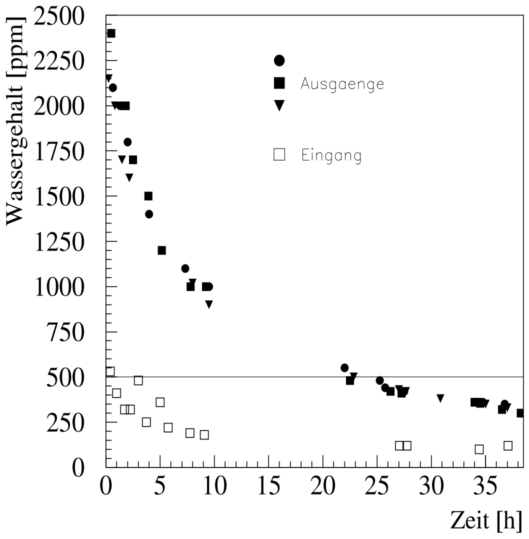

Abbildung 4.15: Die Entwicklung desWassergehaltes bei der Spülung dreier Driftkammern über ca: 40 Stunden. Nach 25 Stunden sind alle Werte unter die 500 *ppm*-Marke gefallen.

des Wassergehaltes der drei Kammern im Vergleich zum Wassergehalt des Eingangsgases zu sehen. Es ist zu erkennen, daß der Wassergehalt sinkt, daß alle drei Kammern gleiches Verhalten zeigen und daß der Wassergehalt immer über dem des frischen Zählgases liegt. Da ein Kammervolumen Gas pro Stunde ausgetauscht wird, liegt also eine zusätzliche, stetig abnehmende Wasserquelle vor, für die nur das angelagerte Wasser im Pokalon in Frage kommt. Nach einem 25-stündigen Spülen ist der Wassergehalt im Zählgas unter tolerable 500 *ppm* gefallen. Die Spurkammern zeigen ein normales Verhalten, das Hygrometer zeigt plausible Werte.

4.3 Das Sauerstoffmeßgerät

4.3.1 Kalibration

Das Instrument verfügt über fünf einstellbare Empfindlichkeitsstufen (0..1 *ppm*, 0..10 *ppm*, 0..100 *ppm*, 0..1000 *ppm* und *Cal*). In der grob empfindlichen Stufe *Cal* wird das Gerät am Kalibrationspunkt Luftsauerstoff (21%) mittels eines Trimmpotentiometers eingestellt. Vorher wird die Brennstoffzelle so lange mit Luft gespült, bis die Zeigerstellung stabil bleibt.

4.3.2 Berechnung und Genauigkeit

Der analoge Ausgang von 0 bis 20 mV stellt die Zeigerstellung des Gerätes auf der Skala von 0 bis 10 abhängig von der eigestellten Empfindlichkeit dar. Abbildung 4.16 zeigt diese Relation. Die Ausgangsverhalten genüngt der Gleichung

$$y = 2x. \tag{4.4}$$

Aus der Umkehrfunktion folgt die Umrechnungsgleichung für den AD-Wandler

$$M(y) = 0,5 \cdot b \cdot y, \tag{4.5}$$

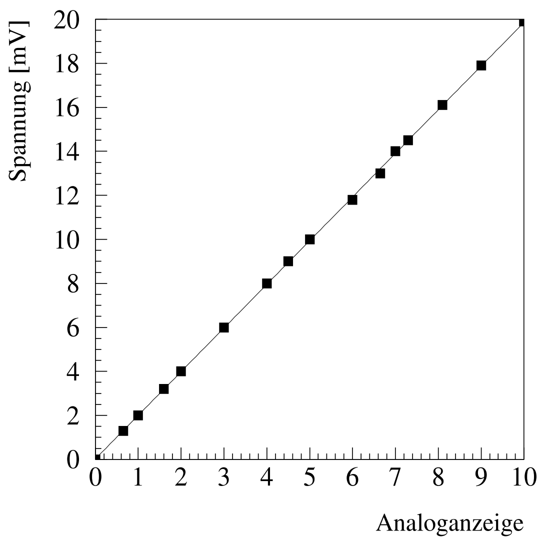

Abbildung 4.16: Ausgangsspannung des Oxymeters aufgetragen über den angezeigten Wert auf der Skala von 1 bis 10 mit linearer Anpassung.

mit

$M(y)$	:	Sauerstoffangteil in ppm,
b	:	Empfindlichkeitsfaktor (1,10,100,1000) in der Einheit $1/mV$,
y	:	Ausgangsspannung von 0..20 mV.

Der Kalibrationspunkt ($21\% O_2$ in Luft) läßt sich auf 5% relativen Fehler genau einstellen (Augenmaß). Unter der Annahme eines linearen Ansprechverhaltens – laut Bedienungsanleitung – entspricht das dem Fehler über den gesamten Meßbereich.

4.3.3 Beispiel

Das offene Gassystem wird für ca. einen Tag zu einem Kreislauf zusammengeschlossen. Dabei überwacht das Sauerstoffmeßgerät den O_2-Gehalt in den Kammern und im Eingangsgas. In Abbildung 4.17 ist der zeitliche Verlauf des Sauerstoffgehaltes in zwei Kammern mit dem des Eingangsgases verglichen. Zum Zeitpunkt t_1 wird der Kreislauf geschlossen. Die Sauerstoffwerte steigen innerhalb eines Tages auf inakzeptable 10 000 ppm.

Nach Öffnen des Kreislaufes zu t_2 sinken die Sauerstoffwerte in Bereiche der tolerierbaren Größenordnung von 100 ppm innerhalb von ca. 1,5 Tagen. In den Gaskreislauf wird kontinuierlich 10% frisches Zählgas zugesetzt, Gasreiniger sind noch nicht zur Verwendung gekommen.

Der hohe O_2-Gehalt im geschlossenen Kreislauf und sein stabiler Wert im offenen Kreislauf von 100 ppm veranlassten eine gezielte Suche nach undichten Stellen, die auch an mehreren Leitungsverschraubungen gefunden worden sind. Kammergas, Eingangsgas und Sauerstoffmeßgerät verhalten sich erwartungsgemäß.

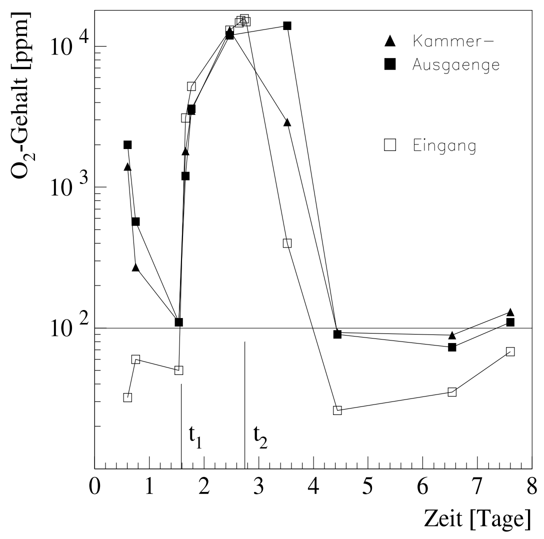

Abbildung 4.17: Die zeitliche Entwicklung des Sauerstoffgehaltes im Zählgas zweier Kammern im Vergleich zum Eingangsgas. Zum Zeitpunkt t_1 wird der Gaskreislauf geschlossen und zu t_2 wieder geöffnet.

4.4 Proportionalkammer

4.4.1 Einrichtung

Die Resultate der Proportionalkammer bei Verschlechterung der Zählgasqualität sind in Abbildung 4.18 gezeigt. Durch Änderung der Gasmischung ändert sich die Gasverstärkung. Der Peak wandert in Bereiche niedriger Energie, der *Escape-Peak* verschwindet, die Pulsform verbreitert und verkleinert sich. Für die Auswertung bietet sich daher die Position des Peakmaximums als Variable an.

4.4.2 Beispiel

Die Proportionalkammer wird mit der Eingangsleitung des Zählgases verbunden. Das Ergebnis sind in Abbildung 4.19 dargestellt. Zum Zeitpunkt $t = 0$ wird der Gaskreislauf für knapp fünf Tage geschlossen. Das Maximum des Spektrums wandert in Regionen größerer Energie. Dieser reproduzierbare Effekt ist bisher nicht verstanden (der Einfluß von Druck und Temperaturschwankungen während der Messung ist ausgeschlossen). Ein Abfall der Gasverstärkung ist innerhalb des ersten Tages nicht zu beobachten. In dieser Zeit reichern sich Stickstoff und Sauerstoff bis zu ihren oberen Grenzen an (vgl. Kapitel 4.1.4 und 4.2.3). Allerdings schwankt die Gasverstärkung nach Anstieg um ca. 5%, während sie im offenen Gasbetrieb (Zeit < 0) größere Stabilität zeigt.
Die Proportionalkammer ist in der Lage, die Verstärkung eines Gases kontinuierlich zu messen. Sie zeigt außerdem, daß die bisher beobachteten Luftanreicherungen im Gaskreislauf die Gasverstärkung nicht mindern.

4.5 Software

Die unterschiedlichen Rohdaten des GCs und der analogen Instrumente müssen zu einem einheitlichen Datenpaket zusammengefaßt werden. Tabelle 4.6 zeigt eine Übersicht der Datentypen.

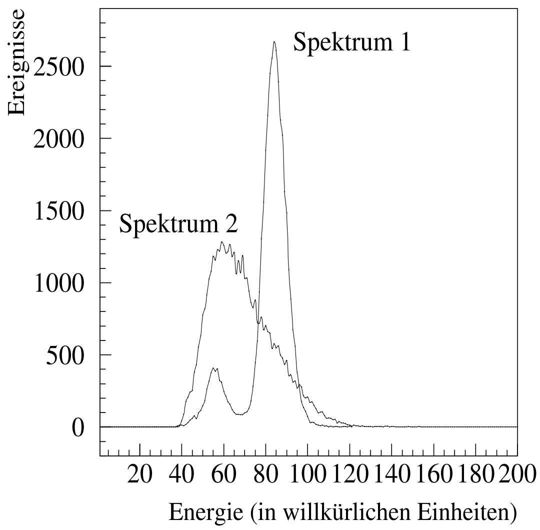

Abbildung 4.18: Zwei Energiespektren, aufgenommen mit der Proportionalkammer. Man erkennt neben dem in Kapitel 3 gezeigten Spektrum 1 in reinem Zählgas ein weiteres bei schlechter Gasqualität (Spektrum 2).

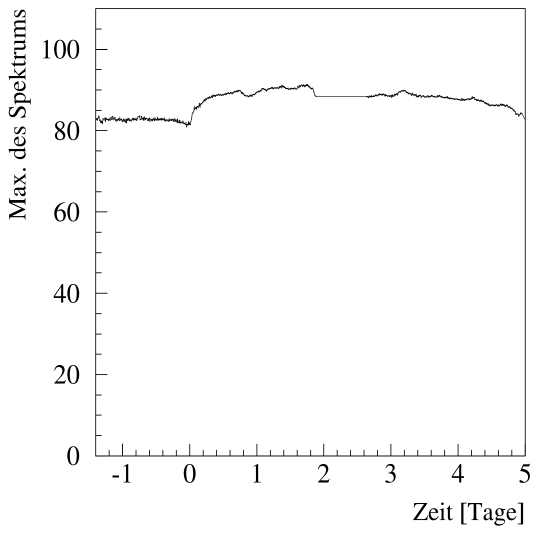

Abbildung 4.19: Zeitliches Verhalten der Proportionalkammer über 5 Tage. Zur Zeit $t = 0$ wird der Gaskreislauf geschlossen (Die automatische Auslese wurde zwischen Tag 2 und Tag 3 für ca. 20 Stunden unterbrochen).

Gas	Instrument	Rohdaten	Verarbeitung	Ausgabe
Ar	GC	$x\%$	Normierung	$X\%$
CF_4		$y\%$		$Y\%$
CO_2		$z\%$		$Z\%$
N_2		$n\%$	keine weitere	$N\%$
O_2	Oxymeter	0...20 mV	AD-Wandlung in den ppm-Wert M	M ppm
H_2O	Hygrom.	4...20 mA	AD-Wandlung und ppm-Umrechnung zu ϑ	ϑ ppm

Tabelle 4.6: Alle automatisch meßbaren Gase, deren Datentypen und die Art ihrer weiteren Verarbeitung.

Zusätzlich wird die Summe s ($s = x + y + z$) in % ausgegeben. Da der Argonwert auch O_2 und N_2 beinhaltet, lauten die Normierungen

$$\frac{x \times s}{100} - N - M = X, \tag{4.6}$$

$$\frac{y \times s}{100} = Y, \tag{4.7}$$

$$\frac{z \times s}{100} = Z, \tag{4.8}$$

$$n \equiv N. \tag{4.9}$$

Das Umgehen der komplizierten Normierung des Stickstoffwertes n verursacht einen zusätzlichen Fehler von erfahrungsgemäßen 4% (von der Summe s der PPU-Säule von $\approx 100 \pm 4$). Der Wassergehalt ϑ wird von keinem Gastyp abgezogen, weil seine typisch erwartete Größe von 50 bis 500 ppm deutlich unter den systematischen Fehlern liegt. In Abbildung 4.20 ist die Exporttabelle des GC zu sehen.

Channel A Results

no	gas	ret.time	area	area %	conc.	norm
--	H2	26.28	0	0.00	0.000	0.000
1		31.00	1050	0.02	0.000	0.000
2	Argon	40.28	4699427	99.65	63.683	99.923
3	N2	78.72	15251	0.32	0.049	0.077

Channel B Results

no	gas	ret.time	area	area %	conc	norm
1		20.80	501	0.01	0.000	0.000
2		30.24	747	0.01	0.000	0.000
3		31.80	697	0.01	0.000	0.000
4		34.20	852	0.01	0.000	0.000
5		35.16	342	0.00	0.000	0.000
6	Argon	36.52	4761133	61.45	63.371	65.918
7	CF4	38.76	2636270	34.03	28.076	29.205
8		52.44	225	0.00	0.000	0.000
9	CO2	56.12	346775	4.48	4.688	4.877

Abbildung 4.20: Exportierte Datentabelle des Programmes Maitre.*Channel A* entspricht der Molsiebsäule und *Channel B* der PPU-Säule.

Kapitel 5

Zusammenfassung

5.1 Möglichkeiten der Gasanalyseanlage

Die als Driftkammersystem konzipierten äußeren Spurkammern des Hera-B Detektors arbeiten mit einem Zählgasgemisch aus 65 % Ar, 30 % CF_4 und 5 % CO_2. Ihr erfolgreicher Betrieb in Hinsicht auf Effizienz und stabil hohe Driftgeschwindigkeit der Elektronen hängt von der Qualität dieses Gemisches, d.h. vom Mischverhältnis und von Anteil von Verunreinigungen, ab. In einem geschlossenen Gaskreislauf sind Veränderungen des Gaszusammensetzung zu erwarten, so daß die Notwendigkeit einer stetigen Gasanalyse besteht. Zu diesem Zweck ist eine automatische Gasanalyseanlage aufgebaut worden, die in einer sich wiederholenden Sequenz maximal fünf Mal pro Tag die Zusammensetzung des Eingangs- und der einzelnen 26 Kammerausgangsgasgemische feststellt und an die Experimentcontrolle (Slow Control) weitergibt.

Die Meßinstrumente (Gaschromatograph, Sauerstoffmeßgerät und Hygrometer) detektieren die in Tabelle 5.1 aufgeführten Gasstypen mit den angegebenen Genauigkeiten. Die Einzelmessungen erfolgen in einem Abstand von 10 Minuten und schließen mit einem Transfer der ermittelten Daten an Slow Control ab. Dort nimmt sie einerseits die Schichtbesatzung zur Kenntnis und leitet gegebenenfalls Maßnahmen zur Verbesserung der Gasqualität ein. Andererseits werden sie als Detektorhistorie gespeichert. Die Meßgenauigkeit und -häufigkeit sind ausreichend für eine ständige Überprüfung des Detektorzustandes aus der Sicht der Gasqualität.

Gas	erwart. Anteil	abs. Ungenauigkeit
Argon	65 %	1,3 %
Tetrafluormethan	30 %	0,6 %
Kohlendioxid	5 %	0,1 %
Sauerstoff	$\approx$100 ppm	5 ppm
Stickstoff	$\approx$200 ppm	8 ppm
Wasser	$<$500 ppm	68 ppm

Tabelle 5.1: Die detektierbaren Gastypen

5.2 Durchgeführte Messungen

Während des Aufbaues der Analyseanlage und des Gassystems der äußeren Spurkammern wurden verschiedene Tests durchgeführt.

- Die Mischanlage stellt ein Zählgas der Zusammensetzung
 (65,56 ± 1,42 ± 1,30)% Ar,
 (29,05 ± 1,43 ± 0,60)% CF_4 und
 (5,48 ± 0,35 ± 0,10)% CO_2 her.
- Bei einem Testbetrieb mit 16 von 26 Kammern und einer Zugabe von 15% frischem Zählgas in den Gaskreislauf steigt der Stickstoffgehalt auf tolerable 550 ppm und bleibt konstant.
- Der Wassergehalt des Zählgases in neu installierten Kammern sinkt binnen 25 Stunden unter tolerable 500 ppm.
- Mit dem Sauerstoffgerät ist der Anstieg und das Absinken des Sauerstoffgehaltes im Zählgas durch vorübergehenden Kreislaufbetrieb zu beobachten.
- Eine Proportionalkammer mißt parallel die Gasverstärkung des gerade analysierten Gases direkt. Im geschlossenen Gaskreislauf variiert sie um tolerierbare 5%.

Das automatische Gasanalysesystem geht erfolgreich in Betrieb. In Zukunft ist eine Erweiterung um die Meßkanäle für die Analyse der Eingangs- und Ausgangsgase der Myonkammern und des inneren Spurkammersystems vorgesehen. Deren Gasgemische bestehen aus 70% Ar, 27% CF_4, 3% CH_4, bzw. 80% Ar und 20% CO_2.

Anhang A

Die Taupunkt-Wassergehalt Umrechnung

Der Taupunkt gibt die Temperatur T an, bei der der Partialdruck des Wassersdampfes p_W den Sättigungsdampfdruck p_D erreicht und das überschüssige Wasser sich als Tau zu kondensieren beginnt [23]. Für p_W gilt:

$$p_W(T) = \frac{\varphi}{m_W} \cdot k_B T, \tag{A.1}$$

mit der absoluten Feuchte φ in $g\,cm^{-3}$, der Masse eines Wassermoleküles m_W und der Boltzmann-Konstanten k_B. Der Sättigungsdampfdruck p_D ist

$$p_D(T) = b(T) \cdot e^{-\frac{W}{k_B T}}, \tag{A.2}$$

wobei b eine temperaturabhängige Größe ist und W die Verdampfungswärme, bezogen auf ein Molekül.

Für die gesuchte absolute Feuchte folgt am Taupunkt dann

$$\varphi(T_{Tau}) = \frac{b(T) m_W}{k_B T_{Tau}} \cdot e^{-\frac{W}{k_B T_{Tau}}}. \tag{A.3}$$

Die Umrechnung von φ in die interessierende Größe ϑ der Einheit *ppm* (*parts per million*) erfolgt über die Konstante $a = m_W/Molvolumen \approx 1,295 \cdot 10^{-27}\ g/cm^3$.
Die endgültige, theoretische Gleichung lautet

$$\vartheta(T_{Tau}) = \frac{b(T) m_W}{a k_B T_{Tau}} \cdot e^{-\frac{W}{k_B T_{Tau}}}. \tag{A.4}$$

Eine Korrelation zur Umrechnungstabelle [16] ist nicht zu erkennen.

Eine empirische Möglichkeit der Näherung bietet die Wexler-Gleichung [24]:

$$\ln p_D = \sum_{i=0}^{6} g_i T^{i-2} + g_7 \ln T, \tag{A.5}$$

mit

g_0	:	-2,83365744$\cdot 10^3$ K^2
g_1	:	-6,028076559$\cdot 10^3$ K

g_2	:	$1{,}954263612 \cdot 10^{1}$
g_3	:	$-2{,}737830188 \cdot 10^{-2}\ 1/K$
g_4	:	$1{,}6261698 \cdot 10^{-5}\ 1/K^2$
g_5	:	$7{,}0229056 \cdot 10^{-10}\ 1/K^3$
g_6	:	$-1{,}8680009 \cdot 10^{-13}\ 1/K^4$
g_7	:	$2{,}7150305 \cdot 10^{1}$

Mit diesem p_D läßt sich wieder ein ϑ aufstellen, das erneut keine Korrelation zur Umrechnungstabelle zeigt.
Eine eigene Näherung bietet die Gleichung

$$\ln p_D = \sum_{i=0}^{4} j_i T^{i-2}, \tag{A.6}$$

mit

j_0	:	$1{,}0 \cdot 10^{6}\ K^2$
j_1	:	$-4{,}5792 \cdot 10^{3}\ K$
j_2	:	$2{,}6997 \cdot 10^{1}$
j_3	:	$-1{,}253 \cdot 10^{-7}\ 1/K$
j_4	:	$3{,}5751 \cdot 10^{-5}\ 1/K^2$

Mit Gleichung A.6 erhält man ein

$$\vartheta(T_{Tau}) = \frac{m_W}{a \cdot k_B T_{Tau}} \cdot \exp(\sum_{i=0}^{4} j_i T_{Tau}^{i-2}). \tag{A.7}$$

Die Anpassung dieses ϑ an die Umrechnungstabelle zeigt Abbildung 4.14.

Anhang B

Oberflächen der Chromatographiesoftware

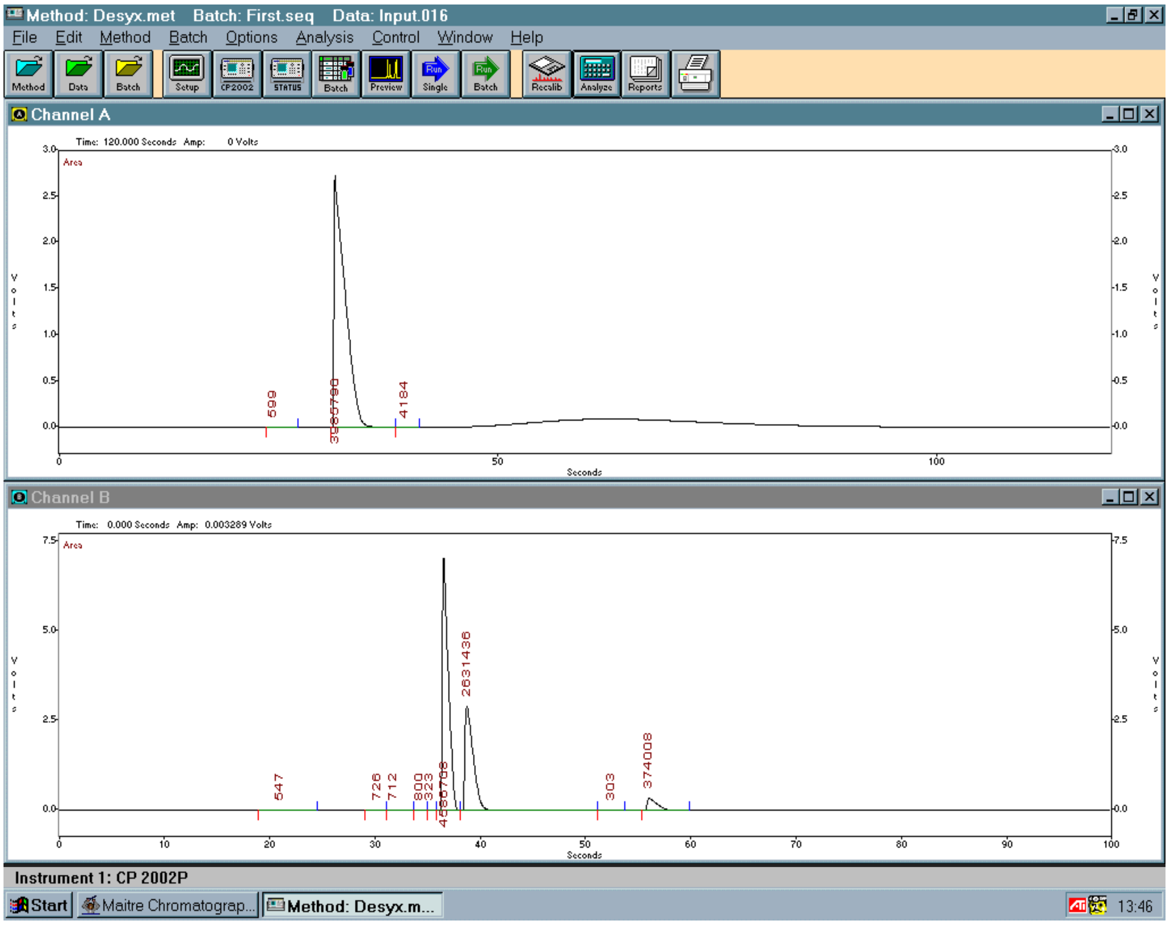

Abbildung B.1: Bedienungsoberfläche des Programms Maitre. Zu sehen ist ein fertig aufgenommenes und ausgewertetes Chromatogramm, bestehend aus der gleichzeitigen Messung der Molsieb- und der PPU- Säule. Mit den Bedienungselementen darüber und darunter läßt sich das Programm steuern.

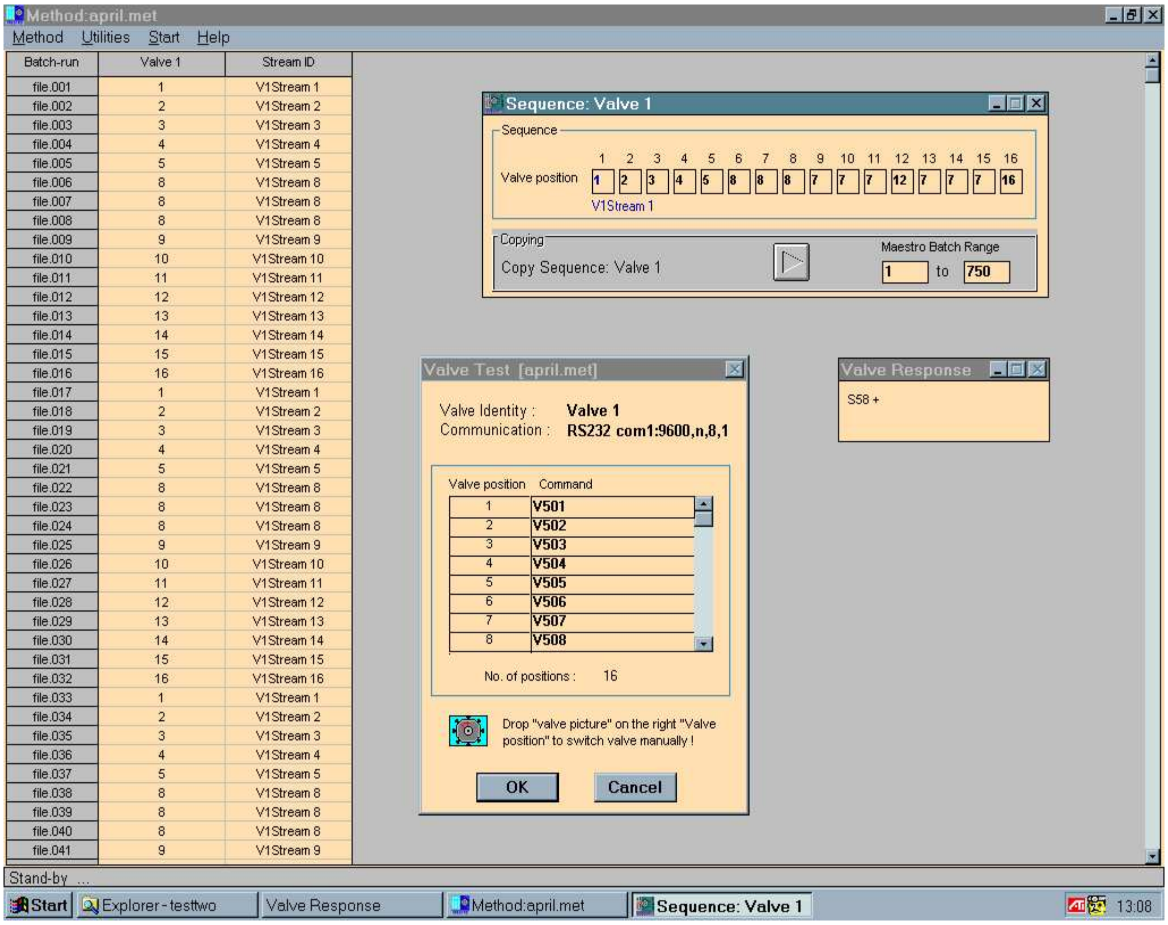

Abbildung B.2: Das Programm Valvecontrol verknüpft eine Meßdatei mit bestimmten Positionen der drei Ventile. Zu sehen ist links diese Zuordnungstabelle sowie Fenster zur Kontrolle der Ventilpositionen, zum Ventiltesten und zum programmieren der Sequenzen.

Literaturverzeichnis

[1] L.Wolfenstein: Parametrization of the Kobayashi-Maskawa Matrix. Phys. Rev. Lett. 51 (1983) 1945.

[2] Hera-B Kollaboration: HERA-B, Proposal. DESY-PRC 94-02.

[3] Hera-B Kollaboration: HERA-B, Design Report. DESY-PRC 95-01.

[4] Robert Pernack: Untersuchung von Gasmischungen mit Blick auf die im Spurkammersystem des HERA-B-Detektors erreichbare Effizienz und Auflösung. Diplomarbeit, Universität Rostock, 1998.

[5] Raoul Zimmermann: Zeitmeßelektronik für den HERA-*B*-Detektor. Dissertation, Universität Rostock, 1999.

[6] Michael Beck: Zeitmeßsystem und Gasgemisch des HERA-B-Driftdetektors. Dissertation, Universität Rostock, 1999.

[7] H.A. Bethe: Zur Theorie des Durchgangs schneller Korpuskelstrahlung durch Materie. Ann. d. Phys., 5-325, 1930.

[8] Particle Data Group, Phys. Rev. Let. D45, 1992.

[9] F.Sauli: Principles Of Operation Of Multiwire Proportional And Driftchambers. Genf 1977.

[10] K. Kleinknecht: Detektoren für Teilchenstrahlung. Teubner Verlag, Stuttgart 1987.

[11] N.I. Koschkin, M.G. Schirkewitsch: Elementare Physik. Hanser, Berlin, 1987.

[12] Persönliche Mitteilung Dr. Wolfgang Struczinski (H1-Kollaboration, RWTH Aachen).

[13] Claus Grupen: Teilchendetektoren. Wissenschaftsverlag, Mannheim, 1993.

[14] Persönliche Mitteilung von Dr. Marcus Hohlmann (Hera-B-Kollaboration).

[15] Bedienungsanleitung des Gaschromatographen CP-2002 P von Varian-Chrompack, 1998.

[16] Bedienungsanleitung des Hygrometers *Superdew* von Shaw, 1998.

[17] Gustav Kortüm: Lehrbuch der Elektrochemie. Verlag Chemie, Weinheim/Bergstraße, 1966.

[18] Bedienungsanleitung des Oxymeters 316-x von Teledyne, 1978.

[19] John V. Hinshaw, Leslie S. Ettre: Introduction to Open-Tubular Column Gas Chromatography. Cleveland, Ohio, 1994.

[20] Leslie S. Ettre, John V. Hinshaw: Basic Relationships of Gas Chromatography. Cleveland, Ohio, 1993.

[21] V.J. Coates, H.J. Noebels, I.S. Fagerson (Hrsg.): Gas Chromatography 1957 (Lansing Symposium). Butterworths, London, 1957.

[22] M.Van Swaay (Hrsg.): Gas Chromatography 1962 (Hamburg Symposium). Butterworths, London, 1962.

[23] Christian Gerthsen, Helmut Vogel: Physik. 17.Auflage, Springer Verlag, Berlin 1993.

[24] Bob Hardy (Hrsg.): The Proceedings of the Third Symposium on Humidity and Moisture. Teddington, London, 1998.

Dank und Erklärung

An dieser Stelle möchte ich mich bei Prof. Henning Schröder für die Gelegenheit bedanken, eine Arbeit im Rahmen des Hera-B Experimentes anfertigen zu können und dabei eine beeindruckende Kollaboration kennengelernt zu haben.
Auch dankbar bin ich der Gruppe des Gassystems verbunden: Dr. Marcus Hohlmann, der immer die Übersicht behalten musste – und behielt; Dr. Ivan Tsakov, Filip Mladjov, Ivan Bonev und nicht zuletzt Manfred Nitsche, deren unendliche Repertoires an Anekdoten mir die Zeit vertrieben, in der ich „nichts“ zu tun hatte.
Meiner Schwester Barbara sei für das Binden der ersten Ausführungen der Arbeit gedankt – ich hoffe, der Leser hält gerade eines dieser Exemplare in Händen.

Ich erkläre hiermit außerdem, diese Arbeit selbsständig verfaßt und keine weiteren als die angeführten Hilfsmittel herangezogen zu haben.

Hamburg im Oktober 1999

Tobias Fox