Elektronische Eigenschaften der Wabendriftkammern des HERA–B–Experimentes

Diplomarbeit

eingereicht von

Hubert J. Wilczek

an der

Humboldt–Universität zu Berlin
Mathematisch–Naturwissenschaftliche Fakultät I
Institut für Physik

November 1996

durchgeführt am

DESY–Institut für Hochenergiephysik in Zeuthen

Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis

Einleitung

Am Deutschen Elektronen–Synchrotron in Hamburg befindet sich zur Zeit der HERA–B–Detektor in der Aufbauphase. Er soll im Frühjahr 1998 in Betrieb genommen werden. Ziel des HERA–B–Experimentes ist der Nachweis der CP–Verletzung im System der B–Mesonen [Pro94], die in dem „goldenen Zerfallskanal“

$$B^0 \longrightarrow J/\Psi\ K_S^0 \longrightarrow \ell^+\ell^-\pi^+\pi^-$$

gemessen werden sollen. Um die B–Mesonen zu erzeugen, wird ein Drahttarget in den Protonenstrahl der Hadron–Elektron–Ringanlage eingeführt. Bei etwa jeder 10^6ten Wechselwirkung eines Protons des Strahls mit einem Nukleon des Drahtes entstehen B–Mesonen. Von diesen B–Mesonen zerfällt nur jedes 10^5te über den gesuchten „goldenen Kanal“. Da man in wenigen Jahren genügend „goldene Zerfälle“ messen will, muß die Wechselwirkungsrate groß genug sein. Aus diesem Grunde wird das Target so im Strahlrohr angeordnet, daß pro Protonenpaket vier Reaktionen stattfinden; dadurch entstehen alle 96 ns um die 100 Teilchenspuren.

Da man diese Spuren unterscheiden muß, spielt deren genaue Messung bei HERA–B eine entscheidende Rolle. Dies geschieht im Inneren und Äußeren Spursystem des Detektors. Das Innere Spursystem besteht aus Mikrostreifen–Gaszählern, die den Bereich bis zu 25 cm Abstand von der Strahlachse abdecken. Spuren in größerem Abstand vom Strahlrohr werden vom Äußeren Spursystem gemessen. Dieses besteht aus Wabendriftkammern mit 5 mm und mit 10 mm Zelldurchmesser.

Diese neuartigen Wabendriftkammern bestehen aus einzelnen, dicht gepackten Driftzellen mit geschlossenen Kathodenflächen. Das Kathodenmaterial ist eine kohlenstoffhaltige Polykarbonat–Folie (Pokalon–C), in die die Wabenstruktur gefaltet wurde. Durch den Kohlenstoffanteil ist diese Folie leitfähig. Um die beim Hochraten–Experiment HERA–B erwarteten Daten interpretieren zu können, müssen die Kammereigenschaften verstanden sein. Daher wurden an solchen Kammern mehrere Untersuchungen durchgeführt. Effizienz und Ortsauflösung werden in [Dec96], mechanische Stabilität, Gasverstärkung und Alterungseffekte in [Sch96] dargestellt.

Die vorliegende Diplomarbeit beschreibt die elektronischen Eigenschaften dieser Kammern. Es wird der Einfluß der leitfähigen Pokalon–C–Folie auf die Signalausbreitung untersucht. Gemessen wurden die Dämpfungslänge und die Signalausbreitungsgeschwindigkeit auf dem Anodendraht, sowie das Reflektionsverhalten am Zellende. Ein weiteres großes Kapitel beschreibt Untersuchungen zum Übersprechen.

1 HERA–B–Experiment

1.1 Der HERA–B–Detektor

Der HERA–B–Detektor (Abbildung 1.1) ist ein Vorwärtsspektrometer und deckt mit 10 mrad bis 220 mrad etwa 90% des Raumwinkels im Schwerpunktsystem ab; er besteht aus folgenden Komponenten:

- Das Target besteht aus acht Drähten, die so im Protonen–Strahlrohr angebracht sind, daß nur solche Protonen mit ihnen wechselwirken, die im Halo des Protonenpaketes mitfliegen. Dadurch bleibt der Protonenstrahl weitgehend ungestört.
- In 1 cm Abstand vom Strahl beginnt der Vertexdetektor. Er besteht aus Silizium–Streifen–Detektoren und dient der genauen Rekonstruktion der Zerfallsvertizes.
- Das Spursystem besteht aus den Inneren und den Äußeren Spurkammern zur Rekonstruktion der Spuren geladener Teilchen. Das Innere Spursystem basiert auf Silizium–Streifen– und Mikrostreifen–Gas–Detektoren. Das Äußere Spursystem besteht aus Wabendriftkammern, deren elektronische Eigenschaften in dieser Arbeit untersucht werden. Die Anordnung dieser Kammern wird in Abschnitt 1.2 näher erläutert.
- Der Magnet dient mit den in seinem Magnetfeld von bis zu 0.8 T installierten Spurkammern der Impulsbestimmung der Teilchen.
- Der RICH — Ring Imaging ČHerenkov counter — dient zur Identifizierung der Kaonen.

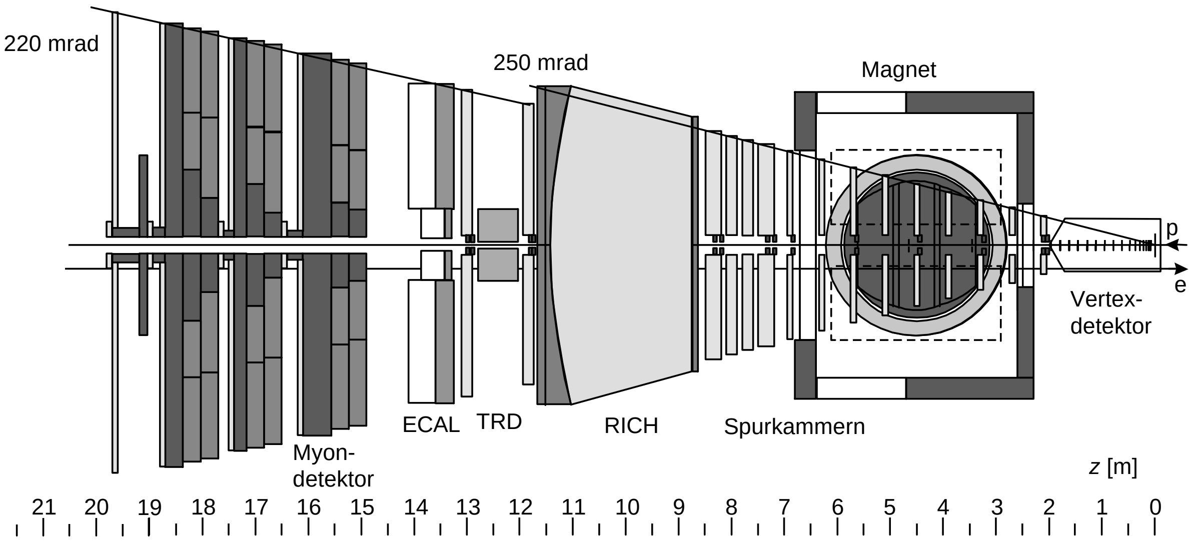

Abbildung 1.1: Der HERA–B–Detektor in der Aufsicht [Des95].

- Im Übergangsstrahlungsdetektor TRD (Transition Radiation Detector) werden Elektronen hoher Energie identifiziert, die im Bereich kleiner Winkel fliegen.
- Im Elektromagnetischen Kalorimeter ECAL wird die Energie von Photonen und Elektronen gemessen. Insbesondere werden hier die Elektronen identifiziert.
- Der Myondetektor besteht aus vier jeweils hinter einer Absorberschicht befindlichen Lagen aus unterschiedlichen Driftröhren. Er dient zur Identifizierung und Spurfindung der Myonen.

Eine sehr ausführliche Beschreibung der einzelnen Komponenten befindet sich in [Pro94] und [Des95].

1.2 Das Äußere Spurkammersystem von HERA–B

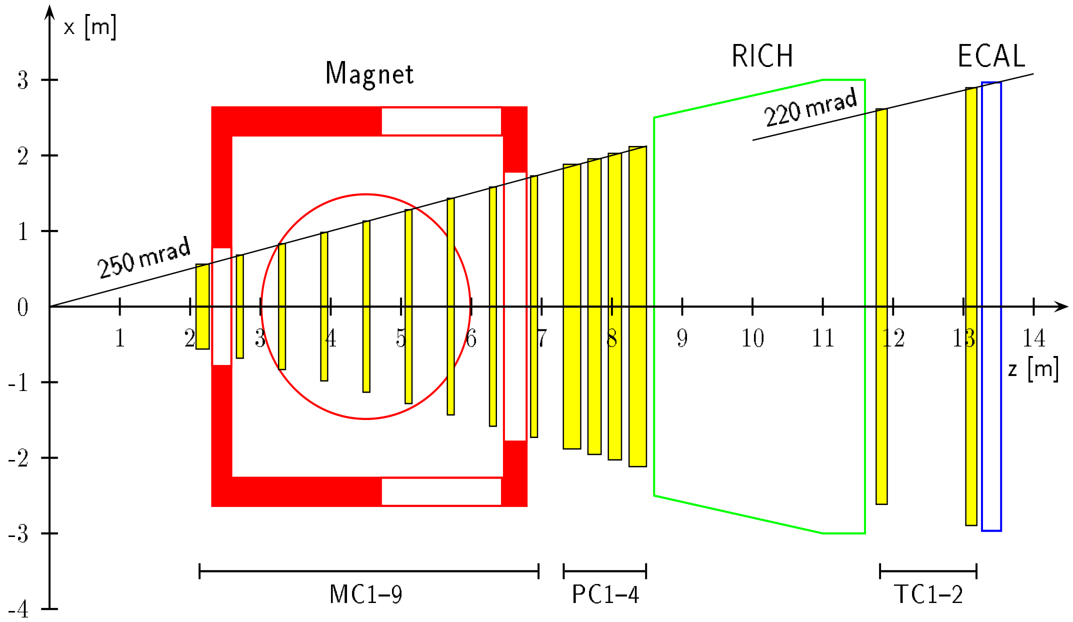

Abbildung 1.2: Das Äußere Spurkammersystem in der Aufsicht [Des95].

Abbildung 1.2 zeigt das Äußere Spurkammersystem in der Aufsicht. Es ist unterteilt in fünfzehn Superlagen mit Größen von $0.9 \times 0.6\,\mathrm{m}^2$ vor dem Magneten bis zu $6.5 \times 4.6\,\mathrm{m}^2$ für die letzte Detektorebene. Diese Superlagen sind in drei Gruppen unterteilt: die Magnet–Kammern MC1 bis MC9 werden im Bereich hinter dem Vertexdetektor bis zum Ende des Magneten stehen. Mit ihnen sollen die im Magnetfeld gekrümmten Spuren geladener Teilchen gefunden werden. Die Spurerkennungs–Kammern PC1 bis PC4 im feldfreien Bereich hinter dem Magneten bis zum RICH werden zum Start der Spurverfolgung benutzt. Die Trigger–Kammern TC1 und TC2 zwischen RICH und Elektromagnetischem Kalorimeter werden hauptsächlich von der ersten Triggerstufe (First Level Trigger — FLT) benutzt, aber auch um Spuren in das Kalorimeter und in den Myondetektor zu extrapolieren.

Die Superlagen sind dazu bestimmt, Raumpunkte für die Spurfindung und für den FLT zu liefern. Dies wird dadurch erreicht, daß die Spuren in drei verschiedenen Projektionsebenen gemessen werden; und zwar liegen die Signaldrähte in vertikaler Richtung (0°) und unter einem Winkel von $\pm 5°$ dazu. Die Wahl von $\pm 5°$ bietet eine hinreichend gute Auflösung in vertikaler Richtung und hält gleichzeitig das Problem der großen Anzahl an Kombinationsmöglichkeiten gering. Die Gesamtzahl der Driftzellen aller fünfzehn Superlagen ist ungefähr 120 000.

Für das Äußere Spurkammersystem von HERA–B wurden Wabendriftkammern (siehe Kapitel 2.2) mit zwei unterschiedlichen Zellgrößen gewählt: in der Nähe des Strahlrohres, wo die Trefferwahrscheinlichkeit sehr groß ist, werden 5 mm–Kammern installiert. Zum Rand der Superlagen hin reichen Kammern mit 10 mm Zelldurchmesser. Eine detailliertere Beschreibung des Äußeren Spurkammernsystems befindet sich in [Des95].

2 Driftkammern

2.1 Allgemeines Prinzip einer Driftkammer

Die Funktionsweise einer Driftkammer kann vereinfacht an einer zylindrischen Driftzelle erläutert werden. Ihre Grundelemente sind in Abbildung 2.1 dargestellt. Das Volumen zwi-

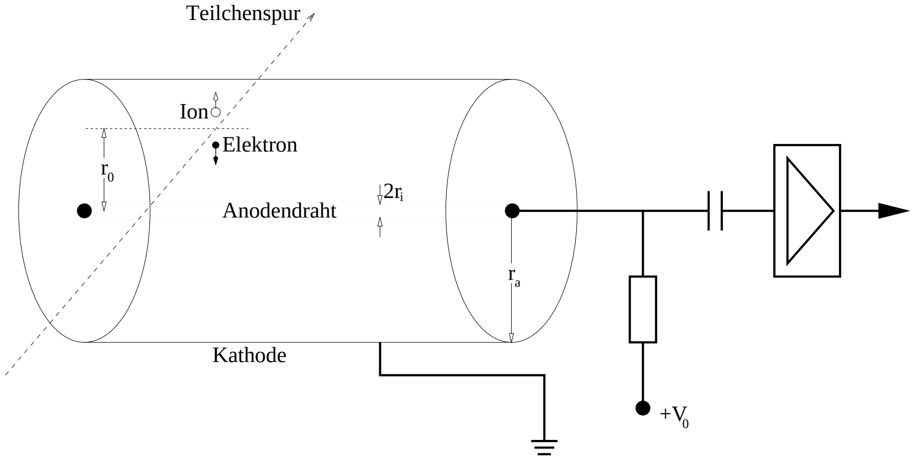

Abbildung 2.1: Schematische Darstellung einer Driftzelle.

schen Anodendraht und Kathodenfläche ist mit einem Zählgas gefüllt und durch Anlegen einer Hochspannung wird zwischen Anode und Kathode ein elektrisches Feld aufgebaut. Dieses steigt mit $1/r$ zum Zähldraht hin an und ergibt sich aus

$$E(r) = \frac{V_0}{r \ln r_\mathrm{a}/r_\mathrm{i}} \quad . \tag{2.1}$$

Durchquert ein geladenes Teilchen eine solche Driftzelle, kann es Gasmoleküle durch Wechselwirkung mit deren Hüllenelektronen ionisieren; dieser Prozeß wird Primärionisation genannt. Das Teilchen hinterläßt unter Verlust von kinetischer Energie eine Spur von Elektron–Ion–Paaren. Der mittlere Energieverlust pro Längeneinheit $\mathrm{d}E/\mathrm{d}x$ eines geladenen Teilchens läßt sich näherungsweise aus der Bethe–Bloch–Formel berechnen [Bet30]:

$$-\frac{\mathrm{d}E}{\mathrm{d}x} = \frac{4\pi r_\mathrm{e}^2 m_\mathrm{e} c^2 N_\mathrm{A} z^2 \varrho}{\beta^2} \frac{Z}{A} \left[\ln\left(\frac{2 m_\mathrm{e} c^2 \beta^2 \gamma^2}{I} \right) - \beta^2 \right] \tag{2.2}$$

r_e	:	klassischer Elektronenradius $\approx 2.8\,\mathrm{fm}$
m_e	:	Elektronenmasse
c	:	Lichtgeschwindigkeit
N_A	:	Avogadrozahl $= 6.022 \cdot 10^{23}\,\mathrm{Mol}^{-1}$
z	:	Ladung des Teilchens in Einheiten der Elementarladung e

ϱ : Dichte des Zählgases
Z : Kernladungszahl des Gasmoleküls
A : Massenzahl des Gasmoleküls
β : Teilchengeschwindigkeit in Einheiten der Lichtgeschwindigkeit c
γ : $1/\sqrt{1-\beta^2}$
I : mittleres Ionisationspotential $\approx 16 \cdot Z^{0.9}\,\mathrm{eV}$, für $Z > 1$.

Entsprechend ihrer Ladung driften nun die Elektron–Ion–Paare im elektrischen Feld auseinander: die Ionen aufgrund ihrer großen Masse und des mit $1/r$ nach außen hin abnehmenden Feldes langsam zur Kathode, die leichten Elektronen im ansteigenden Feld sehr schnell zur Anode. In der Nähe des Anodendrahtes wird die Feldstärke so hoch, daß die Elektronen genügend Energie erhalten, um weitere Gasmoleküle zu ionisieren. Auch die bei dieser Sekundärionisation frei gewordenen Elektronen werden zur Anode hin beschleunigt und erzeugen ihrerseits Sekundärelektronen. Dies führt zu einer lawinenartigen Erzeugung von Ladungspaaren. Dabei hängt die Anzahl der entstehenden Elektron–Ion–Paare von der Anodenspannung ab. Bei Driftkammern wird diese üblicherweise so gewählt, daß pro Primärionisation 10^4 bis 10^6 Sekundärionisationen stattfinden. In Abbildung 2.2 ist eine solche Elektronenlawine und ihre Ladungsverteilung dargestellt.

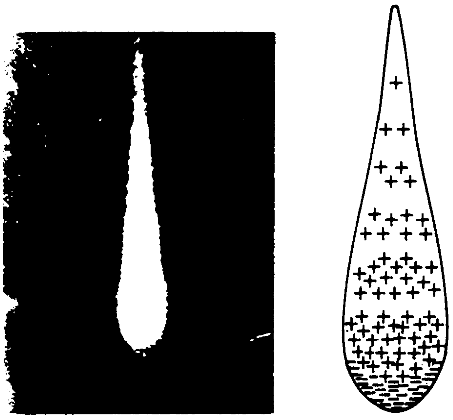

Abbildung 2.2: Tropfenförmige Ausdehnung einer Ladungsverteilung bei Gasverstärkung am Anodendraht. Links: Nebelkammeraufnahme, rechts: Verteilung der Ionen(+) und Elektronen(−) [Loe61] zitiert in [Sau77].

Sowohl Elektronen als auch Ionen tragen zur Signalentstehung am Anodendraht bei. Die durch die Elektronen verursachte Spannungsamplitude ergibt sich aus

$$\Delta V^- = -\frac{Ne}{C}\frac{\ln(r_0/r_\mathrm{i})}{\ln(r_\mathrm{a}/r_\mathrm{i})} \quad . \tag{2.3}$$

Für die von den positiven Ionen verursachte Signalamplitude folgt entsprechend

$$\Delta V^+ = -\frac{Ne}{C}\frac{\ln(r_\mathrm{a}/r_0)}{\ln(r_\mathrm{a}/r_\mathrm{i})} \quad . \tag{2.4}$$

Dabei ist N jeweils die Anzahl der entstandenen Ladungen e und C ist die Detektorkapazität. Da bei der Lawinenbildung der größte Teil der Ladungen in der Nähe des Drahtes $r_0 \ll r_a$

entsteht, kommt der Hauptanteil des Signals von der Bewegung der vom Draht zur Kathode driftenden Ionen her. Die zeitliche Entwicklung des Stromsignals wird beschrieben durch

$$I(t) = -\frac{Ne}{\ln(r_\mathrm{a}/r_\mathrm{i})}\,\frac{1}{t_0+t} \quad \text{mit} \quad t_0 = \frac{\ln(r_\mathrm{a}/r_\mathrm{i})\,r_\mathrm{i}^2}{\mu^+ V_0} \quad . \tag{2.5}$$

Dabei ist μ^+ die Ionenmobilität unter Normaldruck. Im allgemeinen wird dieses Stromsignal durch Differentiation an einem RC–Glied mit niedriger Zeitkonstante $\tau = RC$ kurz gehalten, um das Auslesen hoher Raten zu ermöglichen.

Eine ausführlichere Erläuterung über die Funktionsweise von Driftkammern befindet sich z.B. in [Leo94], [Gru93], [Kle87] und [Sau77].

2.2 Wabendriftkammern bei HERA–B

Das besondere an den Wabendriftkammern bei HERA–B ist deren kompakte Bauweise in Einfach- und Doppellagen. Dadurch entstehen trotz einzelner abgeschlossener Drifträume keine insensitiven Bereiche zwischen den Zellen. Eine Kammer mit Einfachlagenstruktur wird, wie in Abbildung 2.3 dargestellt, aus drei vorgefalteten Folien hergestellt. Diese wer-

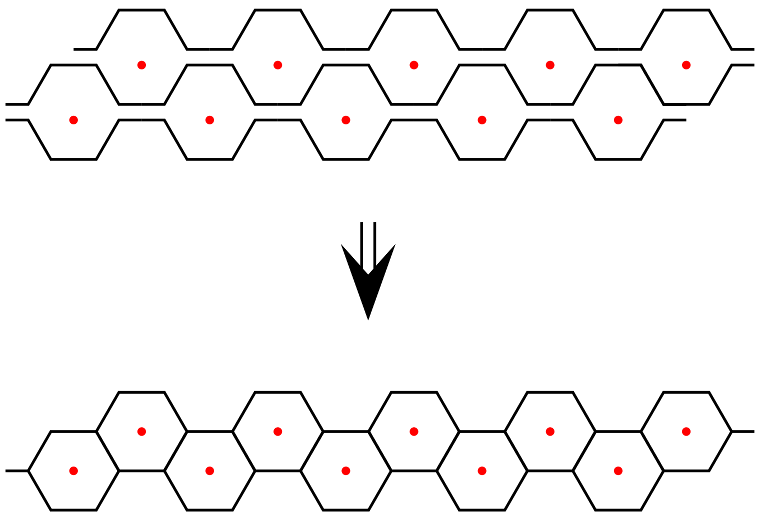

Abbildung 2.3: Bau einer Einfachlage.

den Lage für Lage aufeinandergeklebt, nachdem die Drähte dazwischengespannt wurden. Bei einer Doppellagen–Kammer werden noch zwei weitere Drahtlagen und Folien angebracht; ein Beispiel für eine solche Kammer ist z.B. in Abbildung 4.1 gegeben. Die 75 μm dicke Folie besteht aus Polykarbonat, dem 30 % Kohlenstoff zugefügt ist, um sie leitfähig zu machen. Diese Pokalon–C–Folie hat einen Flächenwiderstand von 120 $\Omega_\square$ und läßt sich leicht in die Wabenstruktur falten; die Methode des Faltens wird in [Bak93] beschrieben. Als Anodendraht wird goldbeschichteter Wolframdraht mit einem Durchmesser von 25 μm benutzt.

In der Nähe des Strahlrohres ist aufgrund der hohen Trefferwahrscheinlichkeit eine zusätzliche Unterteilung der Zellen in unterschiedliche sensitive Sektoren notwendig. Dies wird dadurch erreicht, daß 10 mm breite und 100 μm dicke Streifen aus G10–Material senkrecht zu den Drähten eingebracht werden. Diese G10–Streifen erfüllen eine dreifache Aufgabe: erstens kann der Signaldraht auf den Streifen unterbrochen werden, wodurch zwei Auslesebereiche innerhalb einer Driftzelle entstehen. Zweitens kann auf diesem Streifen der Durchmesser des Drahtes von 25 auf 75 μm gewechselt werden. Über diesen 75 μm–Draht wird das Signal nach außen transportiert und gleichzeitig Gasverstärkung in diesem Transportbereich der Zellen verhindert. Und drittens wird das Durchhängen der bis zu 2.25 m langen Drähte verhindert, indem sie etwa alle 50 cm durch nur 3 mm breite G10–Streifen unterstützt werden.

Die Wabendriftkammern sollen im HERA–B–Experiment mit CF_4/CH_4 (80/20) als Zählgas, mit einer Hochspannung von 2250 V bei 5 mm–Zellen und 2400 V bei 10 mm–Zellen betrieben werden. Dies entspricht einer Gasverstärkung an dem 25 μm–Signaldraht von etwa $4 \cdot 10^4$ bzw. $3 \cdot 10^4$ [Sch96]. Da die Hochspannung auf die Drähte gelegt wird, werden die Signale über einen 330 pF–Kondensator ausgekoppelt. Dies hat aber aufgrund der hohen Zeitkonstanten $\tau \simeq 60$ ns im Vergleich zu $t_0 \simeq 1.5$ ns und zur kurzen Signalformungszeit des ASD8B–Chips von etwa 7 ns [New93] kaum Einfluß auf die beobachtete Signalform. Auf diesem Chip werden die Signale verstärkt, geformt und diskriminiert (siehe auch Anhang A.2).

3 Signalausbreitung

Die in diesem Kapitel vorgestellten Messungen wurden im wesentlichen an einer 2 m langen 5 mm–Testkammer mit Doppellagen–Struktur durchgeführt; Meßergebnisse für 10 mm–Kammern wurden aus Messungen mit einer 4.5 m langen Testkammer gewonnen. Die 5 mm–Kammer besteht aus 24 Zellen, wobei wegen des besseren Zugangs beim Anbringen von Abschlußwiderständen die beiden oberen Lagen benutzt wurden. Der Meßaufbau ist in Abbildung 3.1 dargestellt. Die Kammer befand sich während der Messung in einem Behälter

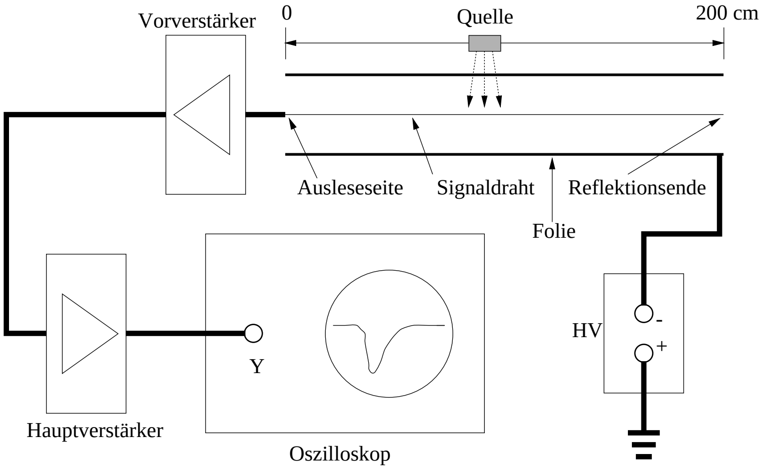

Abbildung 3.1: Meßaufbau zur Bestimmung der Eigenschaften der Signalausbreitung.

aus Plexiglas, der als Gasraum diente. Als Meßgas wurde das Gemisch Ar/CO_2/Isobutan im Verhältnis 80/16/4 benutzt. Die Signaldrähte waren auf einer Seite — der Ausleseseite — direkt mit dem Vorverstärker verbunden. Da bei diesen Messungen die analoge Information über die Signale von Bedeutung ist, wurde zur Signalverstärkung ARGUS–Vertexkammer–Elektronik (siehe auch Anhang A.1) benutzt. Zur Signalerzeugung wurde ein ^{55}Fe–Präparat an verschiedenen Orten entlang der Zelle positioniert. Im folgenden wird die Position dieser Quelle immer als Abstand vom Drahtanfang an der Ausleseseite angegeben; das andere Drahtende wird als Reflektionsende bezeichnet. Gemessen wurde bei einer Spannung von 1370 Volt, wobei die negative Hochspannung auf die Folie gelegt war.

Das am Signaldraht entstehende Signal breitet sich zunächst symmetrisch in beide Richtungen mit der Ausbreitungsgeschwindigkeit v entlang des Drahtes aus. Sieht man sich die Signalform nach dem Hauptverstärker an dessen Analogausgang mit einem Oszilloskop an, stellt man eine starke Abhängigkeit des Kurvenverlaufes von der Quellenposition fest. In den Abbildungen 3.2 und 3.3 sind zwei Beispiele gezeigt, an denen der Einfluß von Dämpfung während der Signalausbreitung und von Reflektionen am Drahtende erkennbar ist. Die dargestellten Kurvenformen sind eine Mittelung über 750 Signale und wurden bei einer Trig-

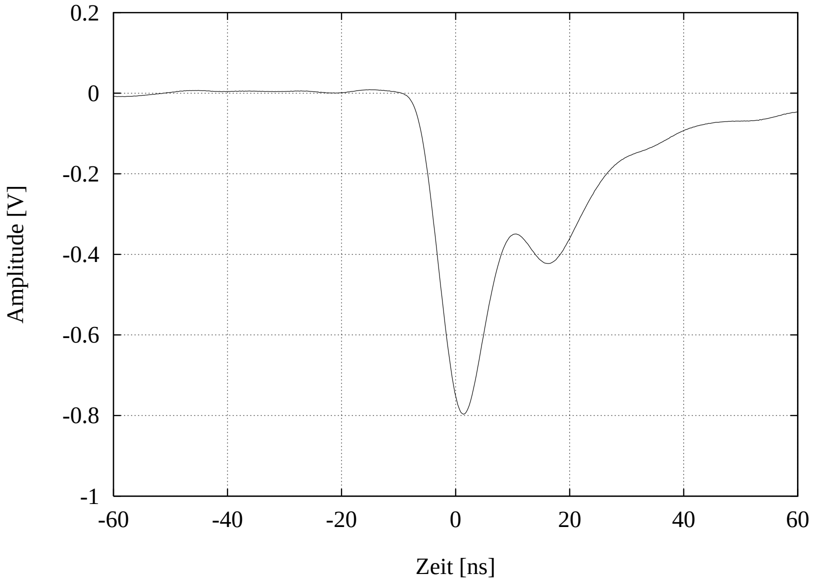

Abbildung 3.2: Signalform bei Positionierung der Quelle in 2 cm Abstand vom Drahtanfang.

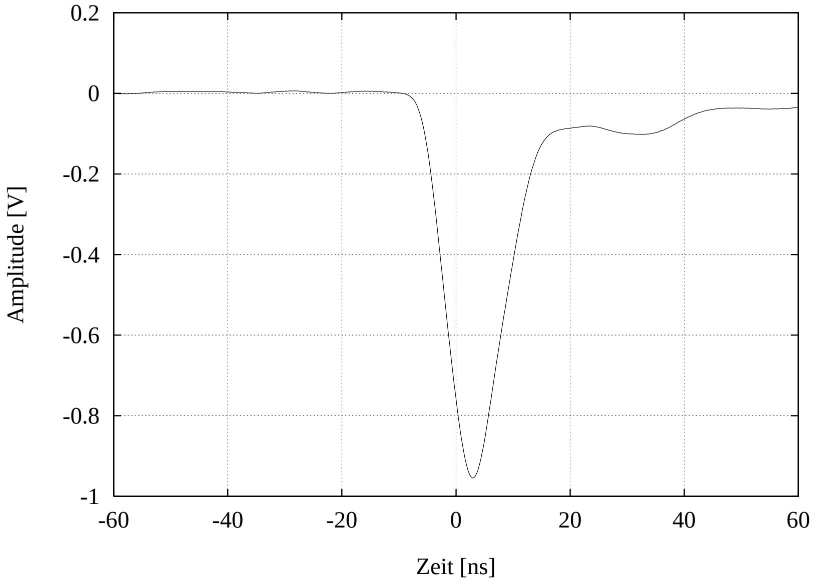

Abbildung 3.3: Signalform bei Positionierung der Quelle am Reflektionsende, in 200 cm Abstand vom Drahtanfang.

Tabelle 3.1: Reflektionskoeffizient ϱ und Amplitude V_r des reflektierten Signals im Vergleich zur Amplitude V_0 unmittelbar vor der Reflektion.

Abschluß	Reflektionskoeffizient ϱ	Amplitude V_r
$R \to \infty$	$\varrho = 1$	$V_r = V_0$
$R > Z_0$	$0 < \varrho < 1$	$V_r < V_0$
$R = Z_0$	$\varrho = 0$	$V_r = 0$
$R < Z_0$	$-1 < \varrho < 0$	$-V_r < V_0$
$R = 0$	$\varrho = -1$	$-V_r = V_0$

gerschwelle von $-700\,\mathrm{mV}$ aufgenommen. In Abbildung 3.2 ist die Quelle 2 cm vom Zellanfang entfernt positioniert. Hier ist das erste Maximum der Amplitude der Teil des Signals, der sich in Richtung der Ausleseseite ausbreitet. Der sich in entgegengesetzter Richtung ausbreitende und am anderen Ende reflektierte Signalteil verursacht das zweite Maximum, dessen geringere Amplitude auf die Dämpfung zurückzuführen ist.

Abbildung 3.3 hingegen zeigt das entstehende Signal, wenn die Quelle am Reflektionsende — 200 cm vom Zellanfang entfernt — positioniert wird. In diesem Fall überlagern sich das ursprüngliche und das reflektierte Signal aufgrund der kurzen Distanz zum Reflektionsende derart, daß sie beim Auslesen des Signals nicht mehr aufgelöst werden können.

Die theoretischen Erläuterungen in diesem Kapitel stützen sich auf [Leo94]. Dabei wird hier die Näherung gemacht, daß es sich bei einer Wabenzelle um eine Koaxialleitung handelt. D.h. die Wabenzelle wird als zylindrisch mit idealem Innen- und Außenleiter angenommen. Dann gilt für ihren Wellenwiderstand Z_0:

$$Z_0 = \sqrt{\frac{L}{C}} \simeq 60\,\Omega \cdot \sqrt{\frac{\mu_r}{\varepsilon_r}} \ln \frac{b}{a} \quad , \tag{3.1}$$

wobei in diesem Fall a der Durchmesser des Signaldrahtes und b der Durchmesser der Wabenzelle ist; ε_r und μ_r sind dann die relative Dielektrizitäts– bzw. Permeabilitätszahl des Gases und können annähernd als $\varepsilon_r = \mu_r = 1$ angenommen werden. Für $a = 25\,\mu\mathrm{m}$ und $b = 5\,\mathrm{mm}$ ergibt sich daraus $Z_0 = 318\,\Omega$.

3.1 Reflektionen

Reflektionen treten bei Koaxialleitungen immer dort auf, wo sich der Wellenwiderstand Z_0 plötzlich ändert. Dies ist bei den Wabendriftkammern am Ende der Signaldrähte und am Eingang des Verstärkers der Fall. Die Stärke der Reflektion kann durch den Reflektionskoeffizienten ϱ ausgedrückt werden:

$$\varrho = \frac{R - Z_0}{R + Z_0} \quad . \tag{3.2}$$

Da Z_0 durch die Zellgeometrie festgelegt ist, hängt ϱ nur noch vom Abschlußwiderstand R ab. In Tabelle 3.1 ist eine Übersicht für die fünf möglichen Fälle gegeben. Ist R größer als die Impedanz Z_0, so hat das reflektierte Signal die gleiche Polarität, aber eine kleinere Amplitude als das ursprüngliche Signals. Für den Grenzfall des offenen Endes ($R \to \infty$) ist das reflektierte gleich dem ursprünglichen Signal. Mit $R < Z_0$ wird ϱ negativ und somit ändert sich die Polarität des reflektierten Signals; dessen maximale Amplitude wird im zweiten Grenzfall, dem kurzgeschlossenen Ende ($R \rightarrow 0$), erreicht. Keine Reflektion erhält man bei idealem Abschluß mit $R = Z_0$. Besonders wichtig für die Wabendriftkammern des HERA–B–Experimentes ist der Fall des offenen Endes, da aus konstruktiven Gründen bei diesen Kammern kein Abschluß möglich ist.

Zuerst wurde auf einfachem Wege versucht, durch eine direkte Messung den Wellenwiderstand der 5 mm–Kammer zu bestimmen. Dazu wurden, wie in Abbildung 3.4 gezeigt, Rechtecksignale von einem Funktionsgenerator auf den Signaldraht gegeben. Das Reflektionsende des Drahtes war mit einem regelbaren Widerstand abgeschlossen. Am Oszilloskop wurde das von den Reflektionen überlagerte Signal dargestellt. Der Wellenwiderstand wurde bestimmt, indem der Abschlußwiderstand so eingestellt wurde, daß die Reflektionen verschwanden. Aus der Messung ergab sich ein Wellenwiderstand der 5 mm–Kammer von

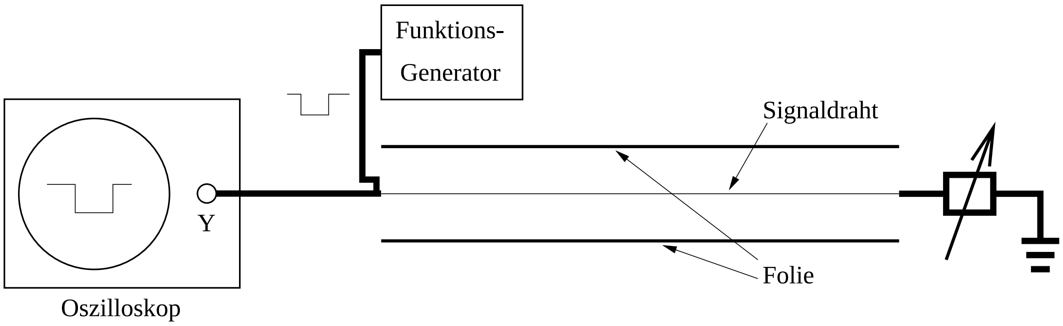

Abbildung 3.4: Aufbau zur direkten Messung des Wellenwiderstandes.

$$Z_0 = (330 \pm 30)\,\Omega \quad , \tag{3.3}$$

was im Bereich des Fehlers mit dem theoretisch berechneten Wert von 318 Ω übereinstimmt.

Um das Signalverhalten am Reflektionsende genauer zu untersuchen, wurde an diesem bei dem in Abbildung 3.1 dargestellten Versuchsaufbau ein Signaldraht über einen 3.3 nF–Kondensator gegen Masse kurzgeschlossen und ein weiterer Draht mit $R = 330\,\Omega$ abgeschlossen. Alle übrigen Drähte hatten ein offenes Ende. In Abbildung 3.5 sind die drei untersuchten Fälle schematisch dargestellt. Zunächst wurden die Signalformen der beiden Grenzfälle — offenes und kurzgeschlossenes Ende — betrachtet. Die dazugehörenden Kurvenformen für eine Quellenposition am Drahtanfang sind in Abbildung 3.6 dargestellt. Der Anteil des Signals, der sich direkt in Richtung des Verstärkers ausbreitet, ist für beide Fälle gleich und verursacht das erste Maximum. Der andere Teil zeigt am Reflektionsende ein unterschiedliches Verhalten: während ein Signal am offenen Ende mit gleicher Polarität reflektiert wird, erfährt es am kurzgeschlossenen Ende einen Polaritätswechsel. Die zwei in Abbildung 3.6 dargestellten Kurven bestehen jeweils aus der Überlagerung des reflektierten mit dem direkten Signal.

Da sich die beiden Signalformen nur durch die entgegengesetzte Polarität der reflektierten Signale unterscheiden, kann das direkte Signal durch Addition und das reflektierte durch Subtraktion der beiden Signalformen bestimmt werden. Die beiden separierten Signalteile sind in Abbildung 3.7 dargestellt. Das reflektierte Signal hat dabei eine geringere Amplitude

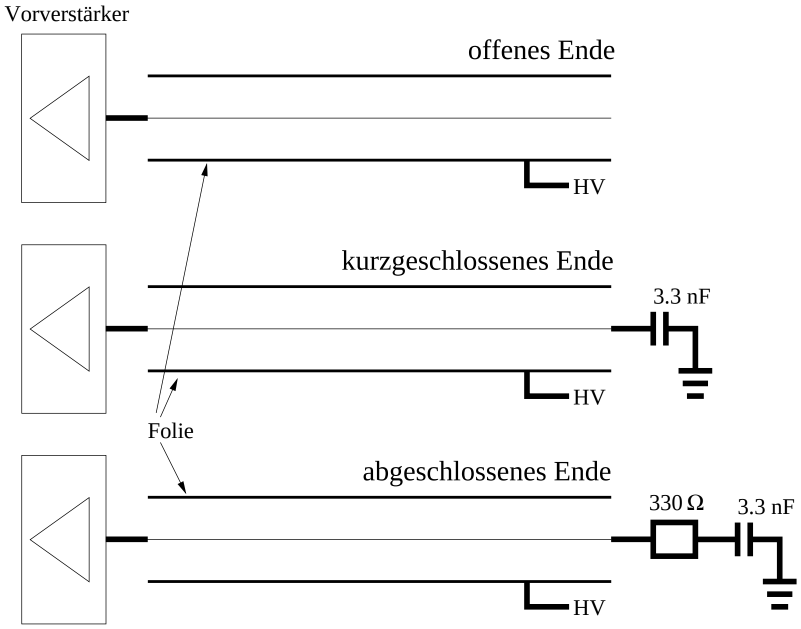

Abbildung 3.5: Schematische Darstellung der unterschiedlichen Abschlüsse.

als das direkte, da es aufgrund seines längeren Ausbreitungsweges eine stärkere Dämpfung erfahren hat. Darauf wird in Abschnitt 3.2 detailliert eingegangen.

Das in Abbildung 3.7 dargestellte direkte Signal stellt eine Signalform ohne Überlagerung durch reflektierte Signale dar. Die gleiche Signalform müßte man also erhalten, wenn der Signaldraht am Reflektionsende mit dem Wellenwiderstand Z_0 abgeschlossen ist. Während der Messungen war daher ein weiterer Draht mit $R = 330\,\Omega$ abgeschlossen; die Signalform dieser Zelle wird in Abbildung 3.8 mit dem direkten Signal verglichen und stimmt gut mit ihm überein.

Die Reflektion an der Ausleseseite hängt von der Eingangsimpedanz des Vorverstärkers ab. Die Reflektionskoeffizienten für die in den Testmessungen verwendeten ARGUS–Vertexkammer– sowie auch für die ASD8B–Vorverstärker sind in Tabelle 3.2 angegeben. Demnach werden am Eingang des ARGUS–Vorverstärkers 40–50 % des Signals reflektiert, während der Rest verstärkt und ausgelesen wird. Dieser reflektierte Anteil kann bei der 2 m–Testkammer nicht mehr aufgelöst werden, da er über den 4 m langen Signalweg zu stark gedämpft wird.

Tabelle 3.2: Reflektionskoeffizienten an der Ausleseseite der Signaldrähte für ASD8B– und ARGUS–Vorverstärker. Die Eingangsimpedanz der ARGUS–Vorverstärker ist [Mic89] entnommen, die des ASD8B–Verstärkers setzt sich zusammen aus den in [New93] angegebenen 125 Ω Eingangsimpedanz des ASD8B–Chips und den dazu in Reihe geschalteten 50 Ω (siehe Abbildung A.1).

Vorverstärker	Eingangsimpedanz R	Reflektionskoeffizient ϱ
ARGUS	100 – 140 Ω	(-0.52)–(-0.39)
ASD8B	175 Ω	(-0.29)

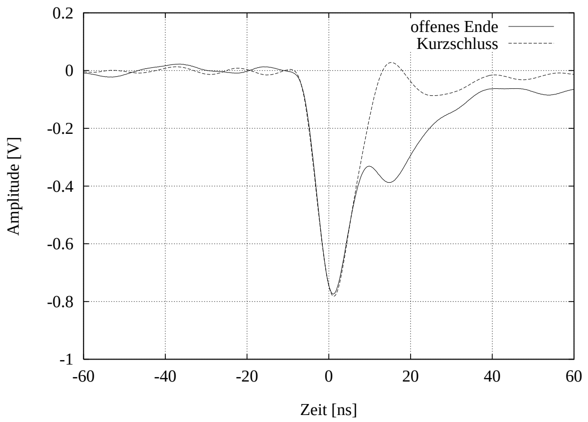

Abbildung 3.6: Signalform bei offenem und bei kurzgeschlossenem Reflektionsende. Die Quellenposition ist dabei jeweils 2 cm.

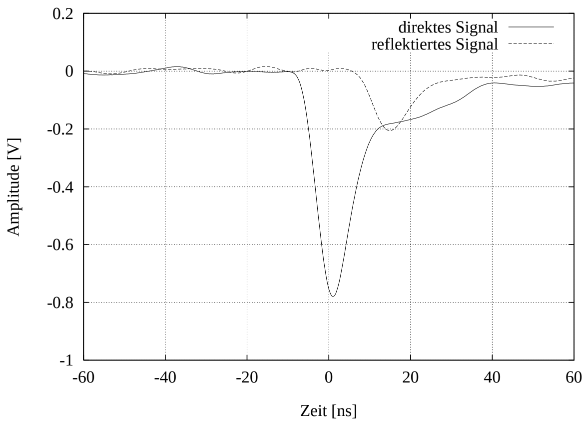

Abbildung 3.7: Direktes und reflektiertes Signal, bestimmt durch Addition bzw. Subtraktion der beiden Signalformen aus Abbildung 3.6.

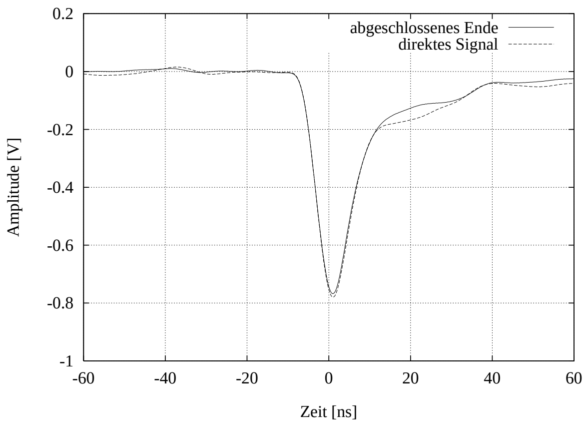

Abbildung 3.8: Direktes Signal und Signalform bei einem Abschluß mit $R = 330\,\Omega$. Die Quellenposition ist auch hier jeweils 2 cm.

3.2 Dämpfungslänge

Bei Koaxialleitungen treten Signalverluste im wesentlichen aufgrund des Widerstandes der Leiter und von Kriechströmen durch das Dielektrikum auf. Für die Wabendriftkammern liegt der Hauptanteil in den Widerständen der Leiter. Dies ist zum einen der Widerstand des 25 μm-Signaldrahtes; er beträgt für die 2 m–Testkammer $(227 \pm 1)\,\Omega$. Zum anderen ist es der hohe Flächenwiderstand der Pokalon–C–Folie[1] von $120\,\Omega_\Box$. Betrachtet man nun den Spezialfall eines sich in eine Richtung ausbreitenden Signals, so ergibt sich für seine Amplitude

$$V(z) = V_0 \cdot \exp(-\alpha z) = V_0 \cdot \exp\Big(-\frac{z}{\lambda}\Big) \quad . \tag{3.4}$$

Hierbei ist $V(z)$ die Amplitude nach einer Ausbreitung des Signals über eine Distanz z, während V_0 die Signalamplitude des Signals am Entstehungsort ist. λ ist hier die gesuchte Dämpfungslänge, die nach zwei Methoden bestimmt wurde:

1. Methode: Hier werden zur Bestimmung von λ die Amplituden der in Abbildung 3.7 dargestellten direkten und reflektierten Signale benutzt. Beide Signale sind am gleichen Ort, 2 cm vom Drahtanfang entfernt, entstanden. Während das direkte Signal nur 2 cm auf dem Weg zum Verstärker zurücklegt, breitet sich das reflektierte Signal 198 cm bis zum Drahtende aus, wird dort reflektiert, um noch weitere 200 cm bis zum Verstärker zurückzulegen. Da bei der Reflektion am offenen Ende keine Verluste auftreten, wird das reflektierte Signal nur aufgrund des längeren zurückgelegten Weges stärker gedämpft. Für beide Fälle läßt sich also die gemessene Amplitude in Abhängigkeit von ihrer Ausgangsamplitude und dem Dämpfungsfaktor bestimmen:

$$V_{\mathrm{direkt}}(2\,\mathrm{cm}) = V_0 \cdot \exp\Big(-\frac{2\,\mathrm{cm}}{\lambda}\Big) \quad \text{und} \tag{3.5}$$

$$V_{\mathrm{reflektiert}}(2\,\mathrm{cm}) = V(398\,\mathrm{cm}) = V_0 \cdot \exp\Big(-\frac{398\,\mathrm{cm}}{\lambda}\Big) \quad . \tag{3.6}$$

   Aus dem Quotienten der Gleichungen (3.5) und (3.6) kann nun die Dämpfungslänge λ bestimmt werden:

$$\lambda_1 = (4.2 \pm 0.4)\,\mathrm{m} \quad . \tag{3.7}$$

2. Methode: Bei dieser Methode werden zwei Signale betrachtet, die bei unterschiedlicher Quellenposition entstanden sind. Das eine davon ist das von der ersten Methode bekannte direkte Signal bei 2 cm (Gleichung 3.5). Das zweite Signal ist das bei Positionierung der Quelle am Reflektionsende entstehende (siehe Abbildung 3.7): bei diesem überlagern sich der direkte und der reflektierte Anteil unmittelbar, sodaß sie sich wie ein einzelnes Signal mit doppelter Amplitude zum Verstärker hin ausbreiten und gedämpft werden. Dann kann man für die gemessene Amplitude

$$V(200\,\mathrm{cm}) = 2\,V_0 \cdot \exp\Big(-\frac{200\,\mathrm{cm}}{\lambda}\Big) \tag{3.8}$$

   schreiben. Aus dem Quotienten der Gleichungen (3.5) und (3.8) kann nun die Dämpfungslänge λ berechnet werden:

$$\lambda_2 = (4.1 \pm 0.3)\,\mathrm{m} \quad . \tag{3.9}$$

[1] Nach Angaben des Herstellers

Aus den Ergebnissen 3.7 und 3.9 ergibt sich für die 5 mm–Kammern eine Dämpfungslänge von

$$\lambda_{5\,\mathrm{mm}} = (4.2 \pm 0.3)\,\mathrm{m} \quad . \tag{3.10}$$

Auch mit der 4.5 m langen 10 mm–Testkammer (siehe auch Kapitel 4.2.2) wurde die Dämpfungslänge bestimmt. Da bei dieser Kammer alle Drähte ein offenes Ende hatten, wurde nur die zweite Methode benutzt. Für 10 mm–Kammern ergibt sich daraus als Dämpfungslänge

$$\lambda_{10\,\mathrm{mm}} = (6.4 \pm 0.3)\,\mathrm{m} \quad . \tag{3.11}$$

3.3 Ausbreitungsgeschwindigkeit

Als weitere elektrische Eigenschaft ist die Ausbreitungsgeschwindigkeit v des Signals durch die Zelle von Bedeutung. Für sie gilt die Beziehung

$$v = \frac{1}{\sqrt{\mu\varepsilon}} = \frac{1}{\sqrt{\mu_r\varepsilon_r}}\,c \quad . \tag{3.12}$$

Dabei sind ε die Dielektrizität und μ die Permeabilität des Dielektrikums; c ist die Lichtgeschwindigkeit. Für ideale verlustfreie Leitungen ($\varepsilon_r = \mu_r = 1$), sollte die Ausbreitungsgeschwindigkeit nach Gleichung (3.12) gleich der Lichtgeschwindigkeit sein. Jedoch ist eine Wabenzelle, wie in Abschnitt 3.2 gezeigt, nicht verlustfrei. Die Ursache dafür liegt in den Widerständen des Signaldrahtes und der Pokalon–C–Folie. Nimmt man beide Leiter weiterhin als ideal an, so ändert sich die effektive Dielektrizität und damit die Ausbreitungsgeschwindigkeit.

Die Ausbreitungsgeschwindigkeit v der Signale in den Wabendriftkammern kann direkt und indirekt bestimmt werden. Bei der indirekten Methode werden auch wieder Signalformen herangezogen. So kann aus der Zeitdifferenz des direkten und des reflektierten Signals aus Abbildung 3.7 und der Wegdifferenz die Ausbreitungsgeschwindigkeit der 5 mm–Kammern zu

$$v_{5\mathrm{mm}} = (0.94 \pm 0.02)\,c \tag{3.13}$$

bestimmt werden. Für die 10 mm–Kammern ergibt sich ein Wert von

$$v_{10\mathrm{mm}} = (0.92 \pm 0.01)\,c \quad . \tag{3.14}$$

Beide Meßwerte wurden an Kammern gemessen, die beidseitig mit leitfähiger Folie beklebt waren; zwischen den Drähten einer Doppellage konnte kein signifikanter Unterschied in der Ausbreitungsgeschwindigkeit festgestellt werden. Die Gründe für das Anbringen der Folie werden in Kapitel 4.2 erläutert. Für die 5 mm–Kammer wurde die Messung auch ohne diese Deckfolie durchgeführt. Die Ausbreitungsgeschwindigkeit reduziert sich dann auf

$$v'_{5\mathrm{mm}} = (0.89 \pm 0.02)\,c \quad . \tag{3.15}$$

Für diese Kammer wurde die Ausbreitungsgeschwindigkeit auch direkt gemessen. Der dazu verwendete Meßaufbau ist in Abbildung 3.9 dargestellt. Mit dem Funktionsgenerator wurden Rechtecksignale auf den Draht gegeben. Die Signale wurden an beiden Enden des

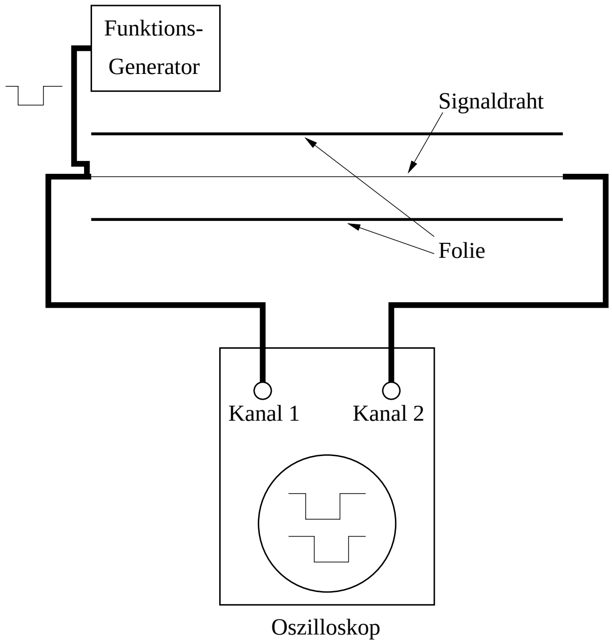

Abbildung 3.9: Aufbau zur direkten Messung der Ausbreitungsgeschwindigkeit.

Signaldrahtes ausgelesen und auf dem Oszilloskop dargestellt. Dabei mußte darauf geachtet werden, daß die Zuleitungskabel zum Oszilloskop gleich lang sind. Aus der Zeitdifferenz der Signale und der Länge des Signaldrahtes kann die Ausbreitungsgeschwindigkeit berechnet werden. Sie ergibt sich für die Kammer mit Deckfolien zu $v_{5\mathrm{mm}} = (0.95 \pm 0.02)\ c$ und ohne Deckfolien zu $v'_{5\mathrm{mm}} = (0.89 \pm 0.02)\ c$. Mit den Ergebnissen aus dieser direkten Messung konnten die Ergebnisse der indirekten Messung bestätigt werden.

4 Übersprechen

4.1 Vorbetrachtungen

Übersprechen nennt man den Effekt, daß in einer Kammer nicht nur am Draht der getroffenen Zelle, sondern auch an dem der Nachbarzelle ein Signal beobachtet werden kann. Die Ursache dafür liegt in der kapazitiven Kopplung der parallel gespannten Drähte. Die Größe dieser Kopplung hängt von der Menge und der Anordnung des im System befindlichen leitfähigen Materials ab. Betrachtet man den Fall einer ideal leitenden Folie zwischen den Drähten, so wären die einzelnen Drähte gegeneinander abgeschirmt und die kapazitive Kopplung und damit auch die Amplitude des Übersprech–Signals gleich Null.

In den Wabendriftkammern des HERA–B–Experimentes befindet sich zwischen den Drähten die Pokalon–C–Folie mit einem Flächenwiderstand von $120\,\Omega_{\Box}$. Aufgrund des endlichen Widerstandes der Folie können sich abschirmende Spiegelladungen nicht schnell genug aufbauen und es gibt einen Durchgriff des elektrischen Feldes, welches ein Übersprech–Signal am Nachbardraht induziert. Zusammenfassend kann man sagen, daß Übersprechen stattfindet:

1. bei der Signalentstehung,
2. bei der Signalausbreitung entlang des Drahtes,
3. bei der Reflektion des Signals am Drahtende,
4. bei der Reflektion des Signals am Verstärkerende,
5. bei der Signalausbreitung im Verbindungkabel zwischen Kammer und Verstärker und
6. im Verstärker selbst.

All diese Effekte tragen zu unterschiedlichen Zeiten und mit unterschiedlichen Vorzeichen und Stärke zur Entstehung eines Übersprech–Signals bei. Da vorhandene Modelle insbesondere beim Einfügen der Pokalon–C–Folie ihre Grenzen haben, konnten die einzelnen Beiträge zum Übersprechen im Rahmen dieser Diplomarbeit nicht aufgelöst werden. Um so wichtiger ist es daher, durch Messungen, die in den folgenden Abschnitten beschrieben werden, ein Verständnis des Übersprechens zu gewinnen.

4.2 Amplitude des Übersprech–Signals

Das Übersprech–Signal besteht aus Anteilen unterschiedlicher Polarität, die einen Einfluß auf die Amplitude und den Triggerzeitpunkt von wirklichen Signalen haben, wenn sie diese überlagern. Besonders wichtig ist dabei der Anteil des Signals, der die gleiche Polarität wie das ursprüngliche Signal hat. Denn wird die Amplitude dieses Signalteils größer als die Triggerschwelle, so wird auch an diesem Kanal ein Treffer gemeldet, obwohl nur die benachbarte Zelle getroffen wurde. Deswegen wird im folgenden nur das Übersprechen X_A mit gleicher Polarität betrachtet. Es berechnet sich nach

$$X_\mathrm{A} = \frac{\Delta V_\mathrm{Nachbardraht}}{\Delta V_\mathrm{Signaldraht}} \tag{4.1}$$

aus dem Quotienten der Amplituden des Übersprech– und des ursprünglichen Signals und wird in Prozent angegeben.

Die für die Messung der Übersprech–Amplitude verwendeten Wabendriftkammern sind in Tabelle 4.1 aufgeführt. Im wesentlichen wurden dabei die zwei Kammern mit Doppellagen-Struktur benutzt. Die Kammer mit 5 mm Zellgröße war 200 cm, die 10 mm–Kammer 450 cm lang.

Tabelle 4.1: Struktur und Länge der Testkammern und die bei den Messungen verwendete Strahlungsquelle.

Zellgröße	Struktur	Länge	Quelle
5 mm	Doppellage	200 cm	^{55}Fe
10 mm	Doppellage	450 cm	^{55}Fe
5 mm	Einfachlage	100 cm	^{106}Ru

4.2.1 Messungen an der 5 mm–Kammer

Ein Querschnitt der 2 m langen 5 mm–Kammer, die auch für die Untersuchung der Signalausbreitung in Kapitel 3 benutzt wurde, befindet sich in Abbildung 4.1. Der Unterschied im Meßaufbau zu den bisherigen Messungen besteht nun darin, daß bei der Untersuchung des Übersprechens mehrere Drähte gleichzeitig ausgelesen werden; dies ist in Abbildung 4.2 schematisch dargestellt. Dabei hatten alle Drähte ein offenes Reflektionsende.

Der Meßvorgang verlief wie folgt: an die mit dem Meßgas gefüllte Kammer wurde Hochspannung angelegt, die Strahlungs–Quelle über der Signalzelle positioniert und die entstehenden Signale am Oszilloskop dargestellt. Dabei wurde die Triggerschwelle so gewählt, daß nur noch auf wirkliche und nicht mehr auf Rausch–Signale getriggert wurde. Da einzelne Signale noch vom Rauschen überlagert sind, wurde zusätzlich der Mittelwert von einer so

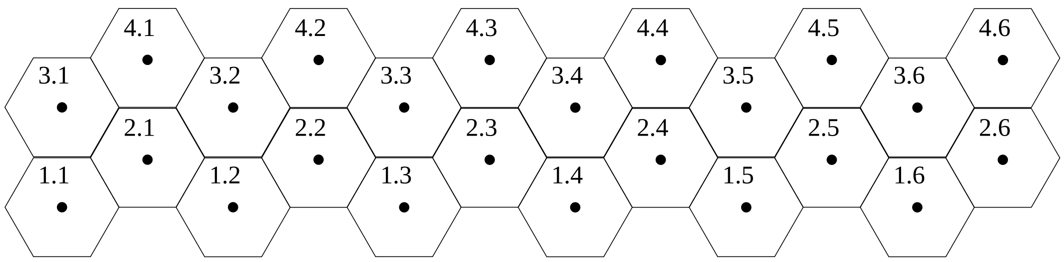

Abbildung 4.1: Querschnitt der 2 m langen Doppellagen–Kammer.

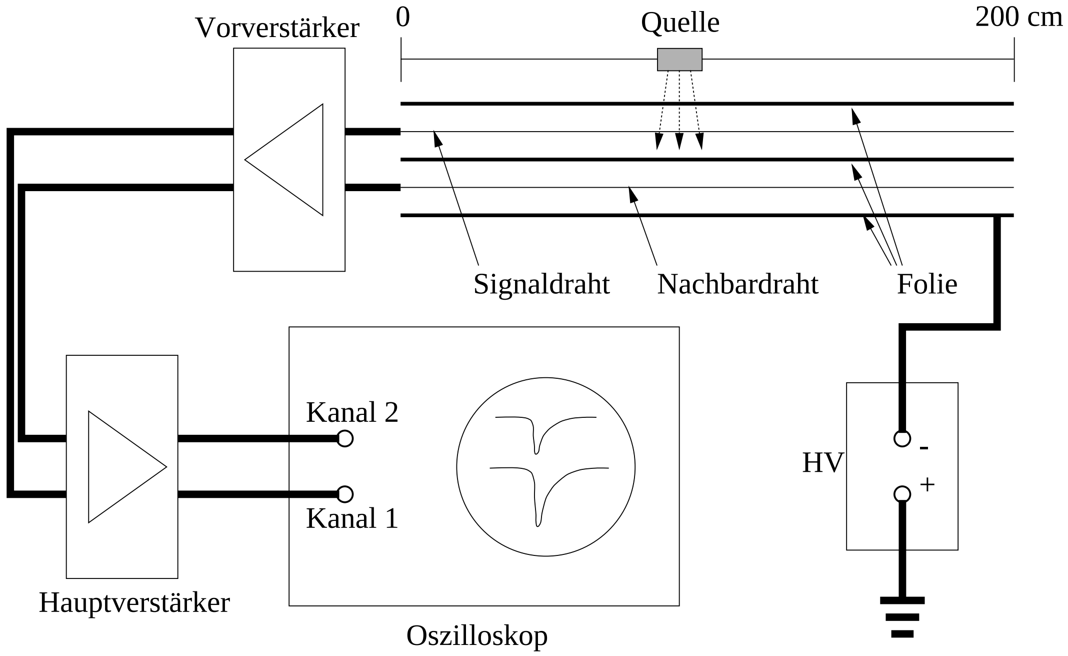

Abbildung 4.2: Aufbau der Übersprech–Messungen: Die Kammer befand sich in einem Gasbehälter aus Plexiglas. Gemessen wurde in Ar/CO_2/Isobutan (80/16/4) bei einer an der Kammerfolie liegenden Hochspannung von $-1370\,$V. Signale wurden erzeugt mit γ–Strahlung aus einer ^{55}Fe–Quelle. Die mit ARGUS–Vertexkammer–Elektronik verstärkten Signale des Signal– und des Nachbardrahtes wurden gleichzeitig auf einem digitalen Mehrkanaloszilloskop dargestellt.

großen Anzahl an Signalformen gebildet, daß das Ergebnis eine mittlere Signalform mit einem geringen statistischen Fehler ist. In den Abbildungen 4.3 und 4.4 sind solche gemittelte Signalformen an zwei Beispielen dargestellt; es ist jeweils ein Fe–Signal und das dazugehörende Übersprech–Signal eines Nachbardrahtes aufgetragen. Aus den Amplituden läßt sich jetzt nach Gleichung 4.1 das Übersprechen für die Quellenposition an der Ausleseseite zu

$$X_{\mathrm{A,2cm}} \quad = (1.7 \pm 0.5)\%$$

und am Reflektionsende zu

$$X_{\mathrm{A,200cm}} = (5.6 \pm 0.5)\%$$

berechnen. Dabei ergibt sich der Fehler aus dem Meßfehler bei der Bestimmung der Amplituden. Wie schon an diesen zwei Beispielen zu sehen ist, besteht für das Übersprechen offensichtlich eine signifikante Abhängigkeit von der Quellenposition. Deswegen wurde die Übersprech–Amplitude an weiteren drei Positionen entlang der Kammer bestimmt; das Ergebnis aller fünf Messungen ist in Abbildung 4.5 dargestellt.

Wie dort zu sehen ist, erreicht das Übersprechen am Reflektionsende nahezu 6 %. Daher wurde nach Möglichkeiten gesucht, dieses auf einfache Art und Weise zu reduzieren. Wie am Anfang des Kapitels beschrieben hängt das Übersprechen von der kapazitiven Kopplung der Drähte ab. Je mehr Leiter sich in einem System befinden, desto kleiner wird diese Kopplung

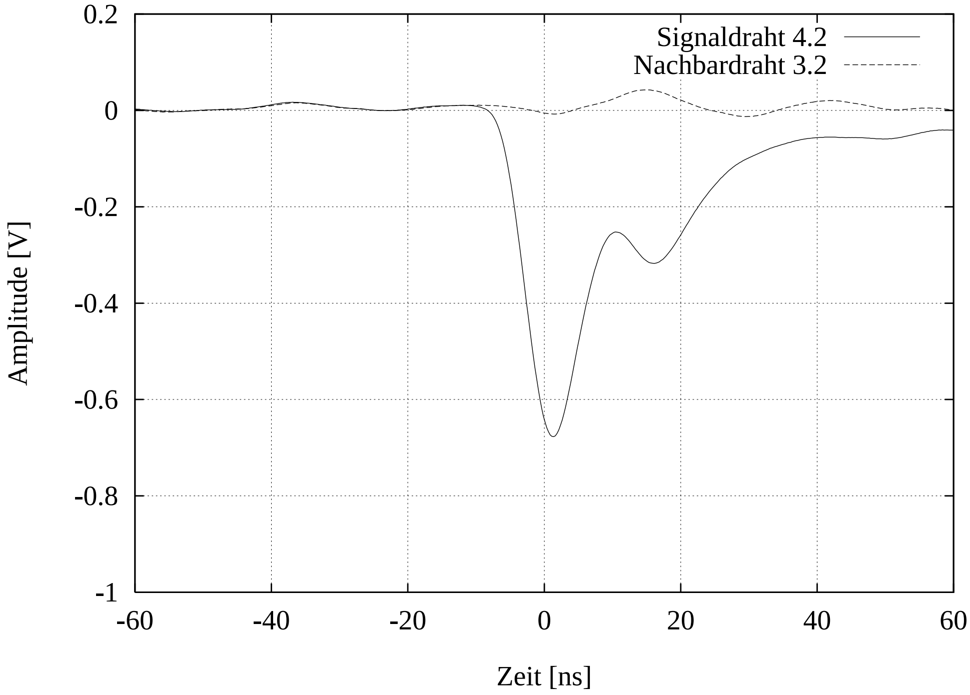

Abbildung 4.3: Signalform des Signaldrahtes und des Nachbardrahtes bei Positionierung der Quelle in 2 cm Abstand vom Drahtanfang. Die dargestellten Kurvenformen sind eine Mittelung über 750 Signale bei einer Triggerschwelle von $-600\,\mathrm{mV}$.

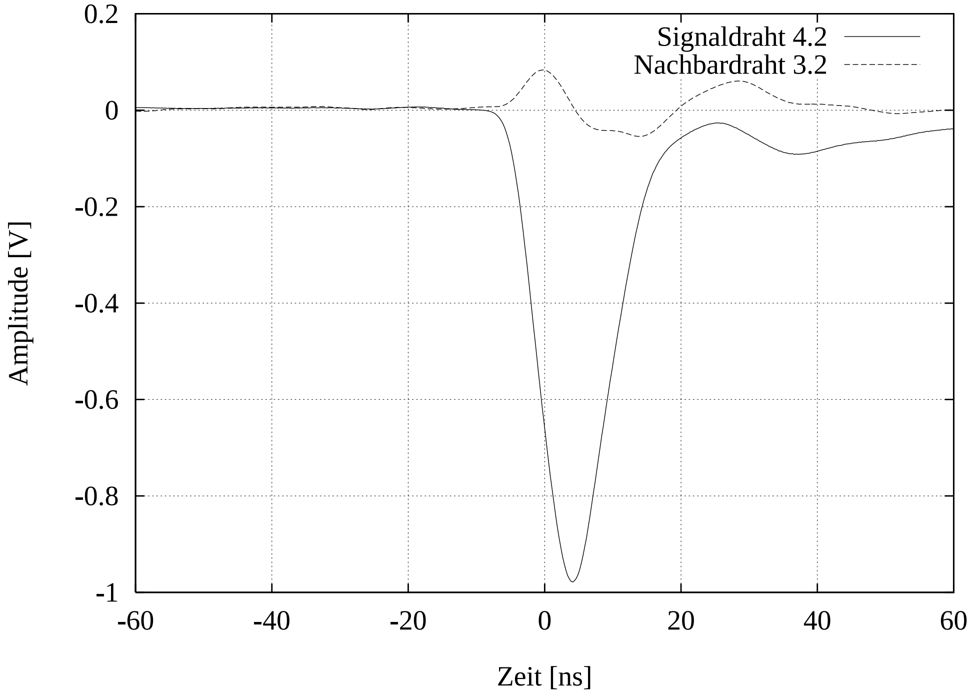

Abbildung 4.4: Signalformen bei Positionierung der Quelle am Reflektionsende, in 200 cm Abstand vom Drahtanfang. Gemessen wurde unter gleichen Bedingungen wie in Abbildung 4.3.

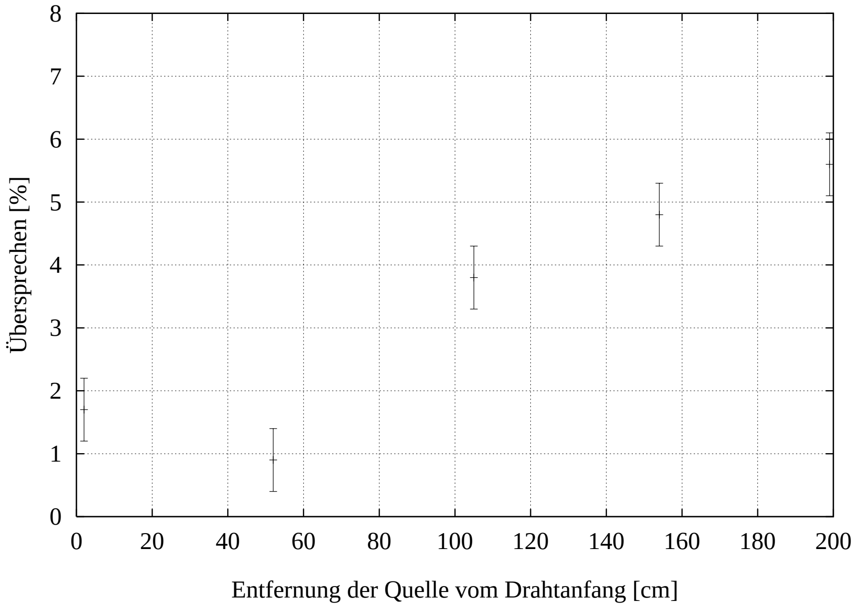

Abbildung 4.5: Übersprechen X_{A} für fünf Quellenpositionen entlang der Signalzelle.

und damit das Übersprechen. Daraus resultierte die Idee, durch Zufügen von leitfähigem Material das Übersprechen auf andere Drähte zu verringern. In diesem Sinne wurde, wie in Abbildung 4.6 gezeigt, mit leitfähigem Kleber eine beidseitig kupferbeschichtete Pokalon–C–Folie auf die Testkammer geklebt. Danach wurden die Übersprech–Messungen wiederholt. Allerdings ist nun zu beachten, daß die Kammer nicht mehr so symmetrisch ist wie zuvor: Zellen der äußeren Drahtlagen (mit den Nummern 1.N und 4.N $\quad N \in 1, \ldots, 6$ — siehe Abbildung 4.6) sind näher an der Deckfolie als die der inneren (2.N und 3.N). Daher muß hier auch untersucht werden, ob das Übersprechen von einer äußeren auf eine innere Zelle sich von dem Übersprechen zwischen zwei inneren Zellen unterscheidet. Gemessen wurde,

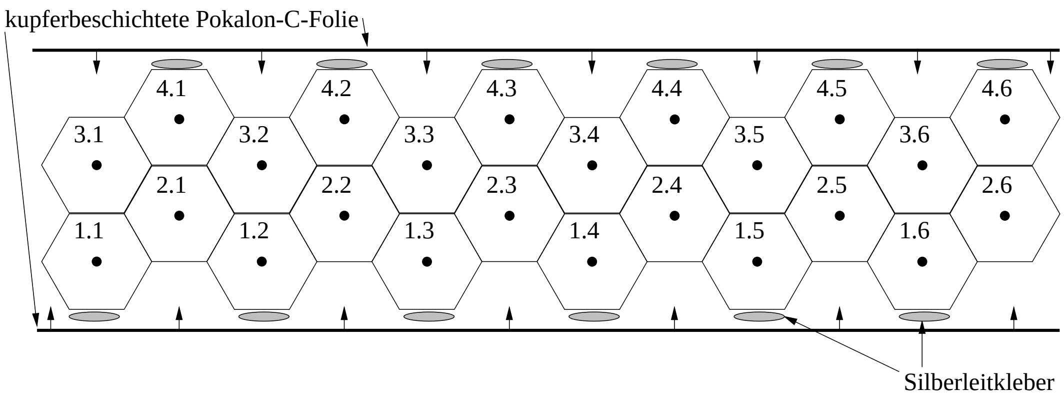

Abbildung 4.6: Querschnitt der 5 mm–Kammer. Zur Unterdrückung des Übersprechens wurde die Kammer mit beidseitig kupferbeschichteter Pokalon–C–Folie beklebt; dazu wurde Silberleitkleber benutzt, um leitenden Kontakt zwischen Kammer und Deckfolie zu gewährleisten.

wie bei der Messung ohne Deckfolie, das Übersprechen von Draht 4.2 auf 3.2 für den äußeren und im Vergleich dazu von 3.4 auf 2.3 für den inneren Fall. Das Ergebnis ist in Abbildung 4.7 dargestellt. Durch die Deckfolie wurde die maximale Übersprech–Amplitude in den In-

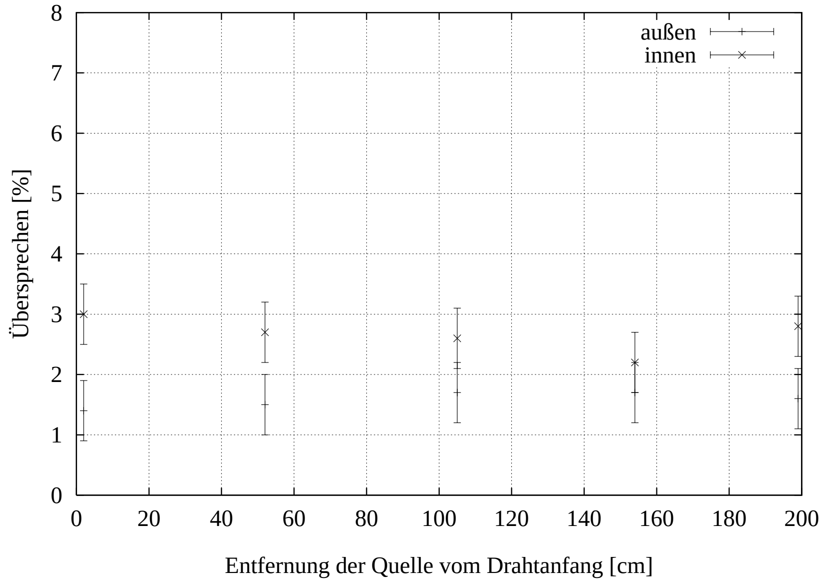

Abbildung 4.7: Übersprechen X_A von Draht 4.2 auf 3.2 (außen) und von Draht 3.4 auf 2.3 (innen) für fünf Quellenpositionen entlang der jeweiligen Signalzelle bei der mit Deckfolien versehenen 5 mm–Kammer.

nenlagen der Kammer auf die Hälfte, in den Außenlagen sogar auf ein Drittel reduziert. Eine Abhängigkeit des Übersprechens von der Quellenposition kann nicht mehr festgestellt werden.

Desweiteren wurde auch das Übersprechen in umgekehrte Richtung — von Draht 3.2 als Signaldraht auf Nachbardraht 4.2 — untersucht. Dabei konnte kein signifikanter Unterschied festgestellt werden.

Als Beispiele werden in den Abbildungen 4.8 und 4.9 zwei Signalformen für dieselben Zellen und Quellenpositionen wie in den Abbildungen 4.3 und 4.4 gezeigt. Die Kurvenformen für das Übersprechen zwischen inneren Zellen unterscheiden sich von den abgebildeten nur durch die Amplitude.

4.2.2 Messungen an der 10 mm–Kammer

Die 4.5 m lange 10 mm–Kammer besteht aus 56 Wabenzellen, die wie bei der 5 mm–Kammer in der Doppellagen–Struktur angeordnet sind. Als Deckfolie wurde 40 μm dicke Aluminiumfolie benutzt, die bei allen Messungen vorhanden war. 28 der 56 Signaldrähte sind in der Mitte der Kammer getrennt, so daß jeweils 28 Drähte mit einer Länge von 2.25 und 4.5 m vorhanden sind. Die Messung erfolgte nach dem gleichen Prinzip wie bei der 5 mm–Kammer. Allerdings wurde als Gasgemisch CF_4/CH_4 (80/20) verwendet und die Signaldrähte lagen auf einem Potential von 2434 V. Die Auslese erfolgte auch über die ARGUS–Vertexkammer–Elektronik mit der Darstellung der Signalformen auf einem Oszilloskop. Das Übersprechen X_A wurde

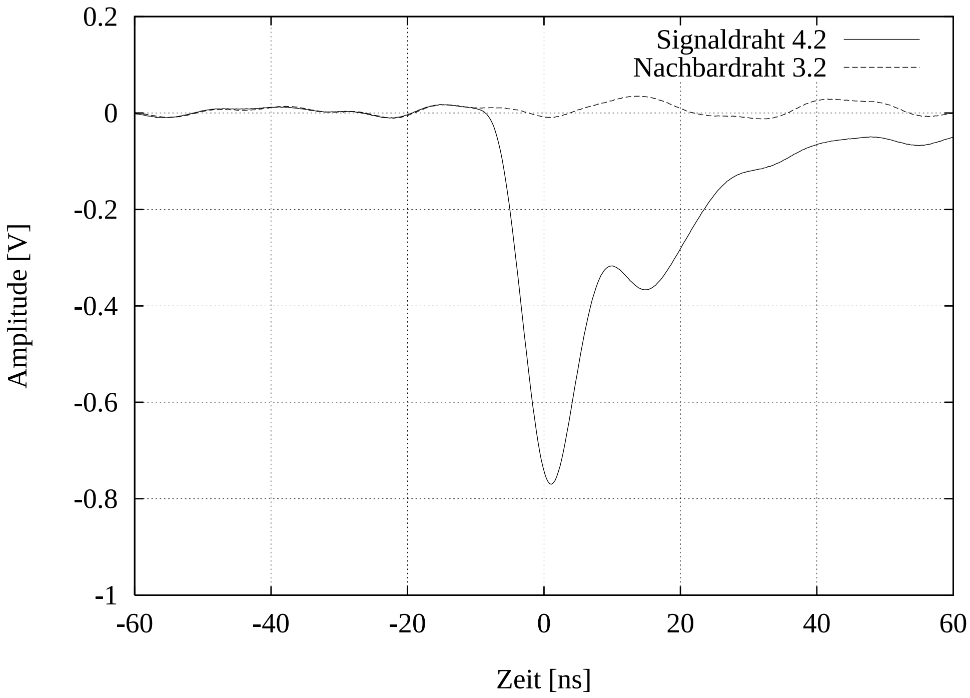

Abbildung 4.8: Signalform des Signaldrahtes und des Nachbardrahtes bei der mit Deckfolien versehenen 5 mm–Kammer. Die dargestellten Kurvenformen sind eine Mittelung über 750 Signale bei einer Quellenposition am Drahtanfang; die Triggerschwelle lag bei $-700\,\mathrm{mV}$.

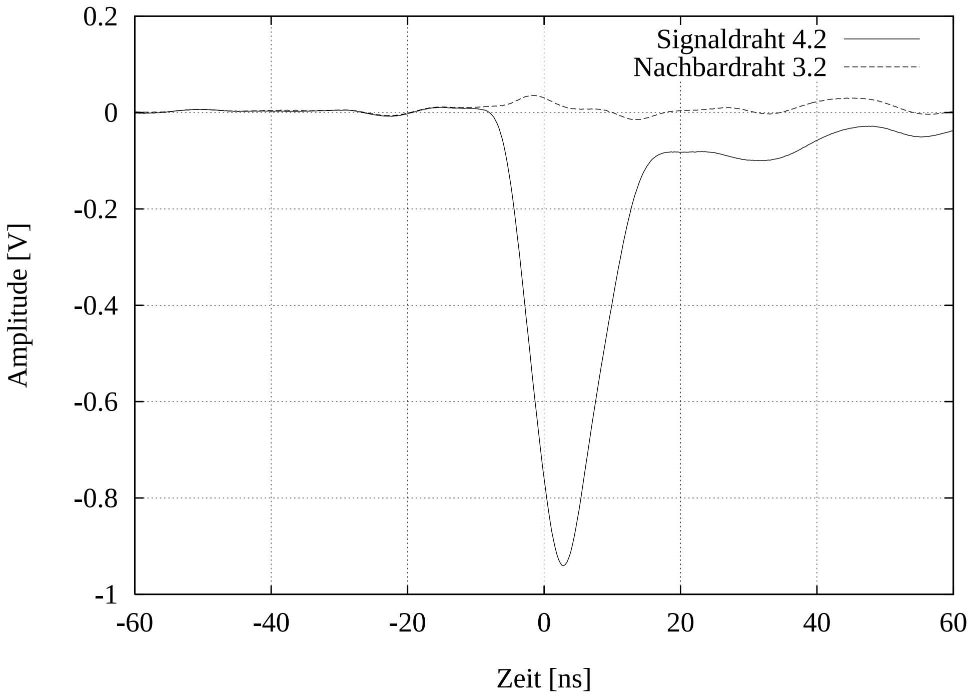

Abbildung 4.9: Unter gleichen Bedingungen gemessene Signalformen bei Positionierung der Quelle am Reflektionsende.

für verschiedene 2.25 bzw. 4.5 m lange Drahtpaare gemessen; die Ergebnisse sind in den Abbildungen 4.11 und 4.12 dargestellt.

Beim Vergleich der Ergebnisse der 2.25 m lange Drähte mit denen der 5 mm–Kammer stellt man trotz annähernd gleicher Länge Unterschiede fest: das maximale Übersprechen bei der 10 mm–Kammer liegt bei etwa 5 % im Vergleich zu 3 % bei der 5 mm–Kammer. Während bei der 5 mm–Kammer mit Deckfolie keine Abhängigkeit von der Quellenposition festgestellt werden konnte, weicht hier der Wert bei 15 cm deutlich von den übrigen ab. Bei 4.5 m langen Drähten zeigt das Übersprechen im Rahmen der Fehler aber auch hier keine Positionsabhängigkeit. Bei der 10 mm–Kammer wurde im Gegensatz zur 5 mm–Kammer kein signifikanter Unterschied zwischen inneren und äußeren Lagen festgestellt.

An einigen Stellen der Kammer waren zwischen den Folien — wie in Abbildung 4.10 gezeigt — zusätzliche Drähte eingefügt, die durch den Kontakt zur Pokalon–C–Folie auf Massepotential lagen. Es wurde untersucht, ob durch sie das Übersprechen noch weiter reduziert werden kann. Jedoch konnte bei den Messungen des Übersprechens in der Nähe solcher Drähte im Rahmen der Meßgenauigkeit kein signifikanter Unterschied festgestellt werden zum Übersprechen zwischen Zellen ohne zusätzliche Drähte.

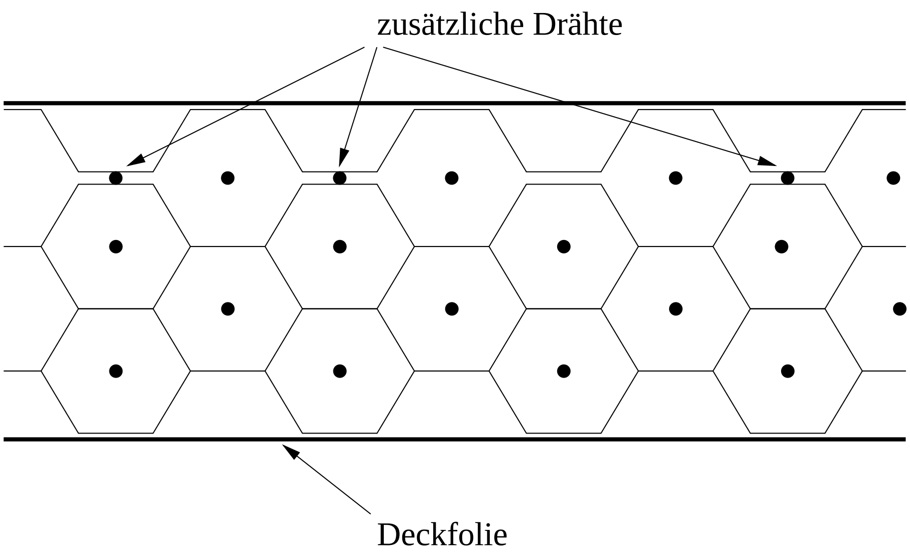

Abbildung 4.10: Schematische Darstellung, in welcher Weise zusätzliche Drähte zur Reduzierung des Übersprechens in der Kammer eingefügt sind.

4.2.3 Messungen an der Einfachlage–Kammer

Die an der 1 m langen Wabendriftkammer mit Einfachlage–Struktur durchgeführten Messungen unterscheiden sich grundlegend von den bisherigen. Da mit dieser Kammer hauptsächlich Zählraten untersucht werden sollten, war es notwendig, einen externen Trigger zu haben. Dieses Ziel konnte dadurch erreicht werden, daß anstatt des ^{55}Fe– ein ^{106}Ru–Präparat als Strahlungsquelle verwendet wurde. ^{106}Ru zerfällt unter Aussendung eines niederenergetischen Elektrons zu 100 % in ^{106}Rh; dieses Elektron wird nicht nachgewiesen. ^{106}Rh zerfällt weiter und emittiert dabei Elektronen mit einer Energie von 3.541 MeV; durchfliegt solch ein Elektron eine Wabendriftzelle, so gibt es dort nur einen Teil seiner Energie ab und kann

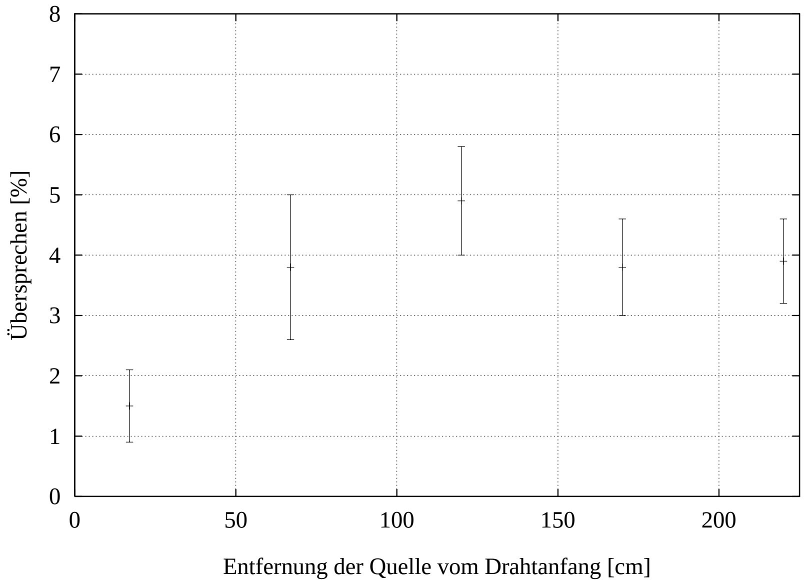

Abbildung 4.11: Übersprechen X_{A} für fünf Quellenpositionen entlang 2.25 m langer Signaldrähte der 4.5 m langen 10 mm–Kammer. Die eingetragenen Werte sind Mittelwerte aus der Messung von zehn Drahtpaaren.

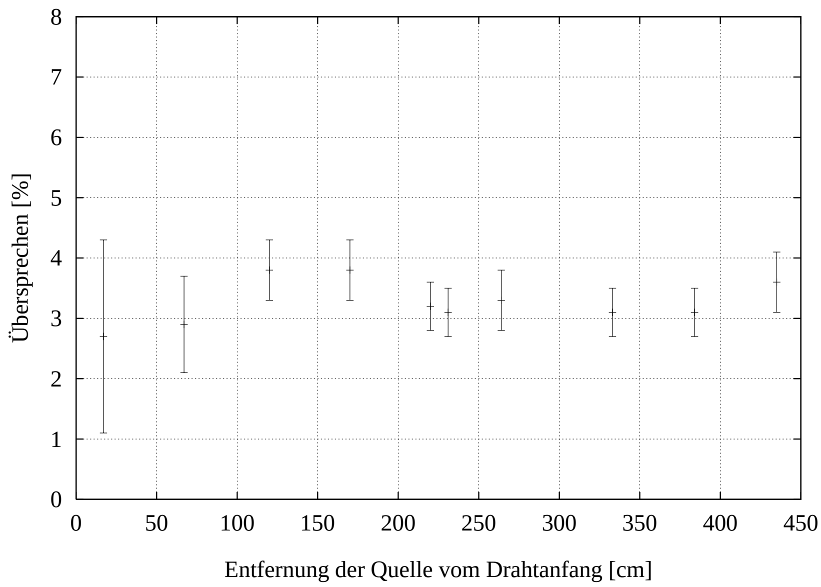

Abbildung 4.12: Übersprechen X_{A} für zehn Quellenpositionen entlang der 4.5 m langen Signalzellen der 10 mm–Kammer. Die eingetragenen Werte ergeben sich jeweils aus der Mittelung über fünf Meßwerte.

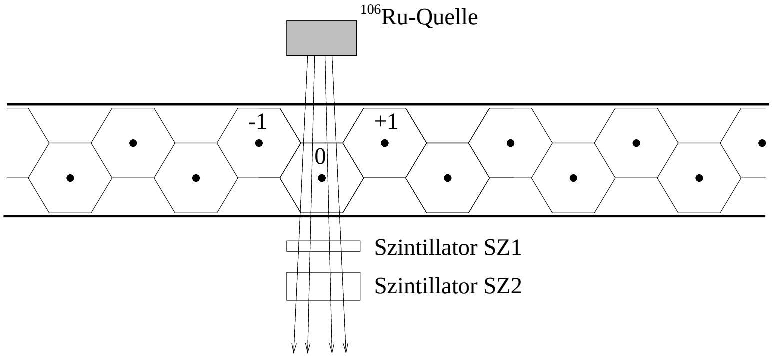

Abbildung 4.13: Querschnitt der Einfachlage–Kammer

hinter der Kammer noch mit Szintillationsdetektoren nachgewiesen werden. In den Abbildungen 4.13 und 4.14 ist der Versuchsaufbau schematisch dargestellt. Um sicherzugehen, daß das reine Übersprechen gemessen wird, wurde nur der Signaldraht der bestrahlten Zelle 0 auf Hochspannung gelegt. Dadurch wird verhindert, daß an den Nachbardrähten Gasverstärkung stattfinden kann, wodurch dort nur noch das Übersprech–Signal und keine wirklichen Signale entstehen können. Der Signaldraht ist über einen Koppelkondensator, die Nachbardrähte direkt mit dem Vorverstärker verbunden. Nach Schaltung 4.14 wird am Oszilloskop nur getriggert, wenn ein Elektron sowohl in der Signalzelle, als auch in beiden Szintillatoren registriert wird. Um den Ablesefehler am Oszilloskop gering zu halten, wurde die Schwelle am Diskriminator auf $-600\,\mathrm{mV}$ eingestellt; dadurch wurden nur Signale mit hoher Amplitude

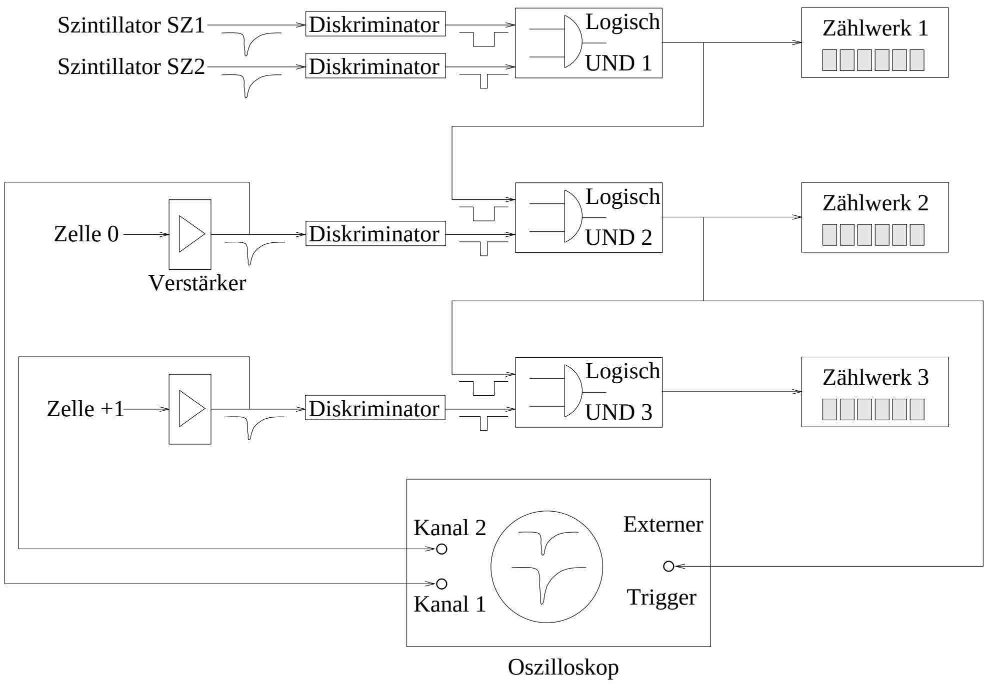

Abbildung 4.14: Schaltkreis der Triggerbedingung zur Messung des Übersprechens.

registriert. Die maximale Amplitude lag bei etwa 900 mV. Zusätzlich wurde am Oszilloskop über 400 Signalformen gemittelt, wodurch der statistische Fehler klein gegen den Ablesefehler wurde. Die so bei 2250 V für drei Quellenpositionen gemessenen Übersprech–Amplituden sind in Tabelle 4.2 eingetragen.

Tabelle 4.2: Übersprech–Amplitude X_A an drei Positionen der Einfachlage–Kammer. Der Fehler ergibt sich aus den Ablesefehlern der Amplituden am Oszilloskop.

Position	Bezeichnung	Übersprechen X_A [%]
4.5 cm	Pos 0	0.5 ± 0.3
44.5 cm	Pos 1	1.1 ± 0.3
91.0 cm	Pos 2	1.5 ± 0.3

Bei allen bisherigen Messungen wurden nur mittlere Amplituden betrachtet. Mit der zuvor benutzten Schaltung 4.14 kann auch die Amplitudenverteilung der ^{106}Ru–Signale gemessen werden. Dazu muß lediglich das Oszilloskop durch einen Analog–zu–Digital–Konverter (ADC) ersetzt werden. Durch den externen Trigger wird im ADC ein Zeitfenster geöffnet, in dem die Amplitude des Signals gemessen und nach ihrer Größe in einen der ADC–Kanäle sortiert wird. Eine Amplitudenverteilung der in der Kammer von der ^{106}Ru–Strahlung verursachten Signale ist in Abbildung 4.15 durch das weiße Histogramm verdeutlicht; je höher die Kanalnummer, desto größer ist die Signalamplitude. Diese Verteilung wurde bei einer

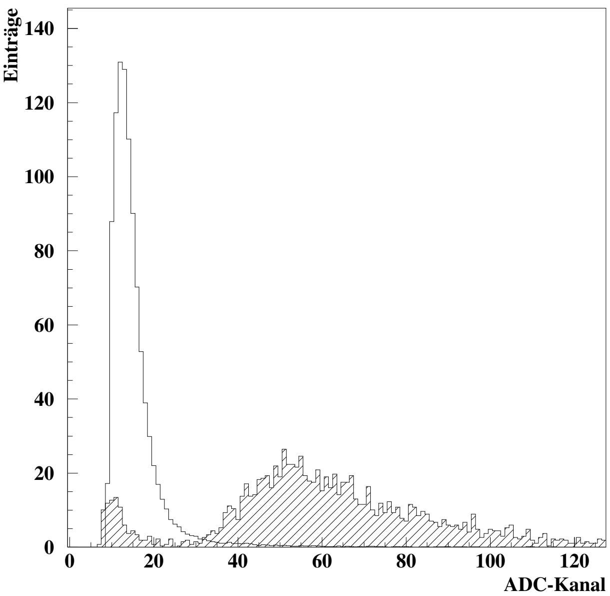

Abbildung 4.15: Dargestellt ist die Amplitudenverteilung der mit einer ^{106}Ru–Quelle erzeugten Signale (weißes Spektrum) und die Amplitudenverteilung derjenigen Signale, bei denen gleichzeitig an der Nachbarzelle ein Signal gemeldet wurde (schraffiert). Beide Histogramme sind auf die gleiche Anzahl von Einträgen normiert.

Hochspannung von 2100 V und einer am Diskriminator eingestellten Schwelle von 20 mV aufgenommen.

Durch eine weitere kleine Änderung des Aufbaus kann auch noch untersucht werden, Signale welcher Amplitude am Nachbardraht ein so großes Übersprech–Signal erzeugen, daß es die Schwelle überschreitet und damit auch das dritte logische UND erfüllt ist. Nutzt man dieses dritte UND zum Öffnen des Zeitfensters im ADC, so werden nur dann die Signal–Amplituden gemessen, wenn am Nachbardraht auch ein Signal gemeldet wird. Das in Abbildung 4.15 schraffierte Histogramm stellt also die Amplituden derjenigen Signale dar, die ein Übersprech–Signal am Nachbardraht verursacht haben. An dieser Abbildung ist zu beachten, daß beide Histogramme auf die gleiche Anzahl an Einträgen normiert sind; dies wurde aus Gründen der Übersichtlichkeit gemacht. Bei gleicher Meßzeit hätte das schraffierte Übersprech–Spektrum nur 0.9 % der Einträge des Signal–Spektrums erreicht und wäre somit unter diesem verschwunden.

Das schraffierte Histogramm verdeutlicht, daß nur Signale mit großer Amplitude am Nachbardraht ein Übersprech–Signal erzeugen können, dessen Amplitude groß genug ist, die Diskriminatorschwelle zu überschreiten. Die Anhäufung am Anfang des Histogramms (bis etwa Kanal 25) ist auf Zufallskoinzidenzen des Rauschens am Nachbardraht mit wirklichen Ereignissen am Signaldraht zurückzuführen. Die Anzahl dieser Koinzidenzen liegt im Vergleich zu wirklichen Signalen in einem Bereich kleiner als 0.1 %.

4.3 Übersprech–Zählrate

Beim HERA–B–Experiment werden die Wabendriftkammern mit der ASD8B–Elektronik ausgelesen werden. Diese wandelt das analoge Signal in ein digitales um, wobei die Informationen über die Signalform und -amplitude verloren gehen. Daher ist von Interesse, wie sich die Übersprech–Amplitude auf die Zählraten auswirkt. Um diesen Zusammenhang zu untersuchen wurden Zählraten–Messungen mit ARGUS– und mit ASD8B–Verstärkern durchgeführt: mit ersteren, da man sie mit den Amplituden–Messungen in Verbindung bringen kann (siehe Abschnitt 4.4); mit letzteren, weil die ASD8B–Elektronik im HERA–B–Experiment benutzt werden soll.

4.3.1 Messungen an der Einfachlage–Kammer

Um den Einfluß des Übersprechens auf die Zählrate zu untersuchen, werden nun anstatt des Oszilloskopes oder des ADCs die in Abbildung 4.14 dargestellten Zählwerke benutzt. Alle weiteren Messungen wurden mit dieser Meßanordnung durchgeführt. Am Zählwerk 2 wird die Anzahl der Signale in Zelle 0 gezählt, die die Schwelle überschreiten, wenn gleichzeitig beide Szintillatoren ansprechen. Durch die Forderung dieser Koinzidenz mit den Szintillatoren wird sichergestellt, daß nur auf wirkliche Signale getriggert wird. Am Zählwerk 3 werden nun die in Zelle +1 die Diskriminatorschwelle überschreitenden Signale gezählt; auch hier wird das Rauschen durch die Forderung einer weiteren Koinzidenz unterdrückt. Da an dieser Zelle keine Hochspannung anliegt, werden hier nur solche Signale gezählt, die durch das Übersprechen vom Signaldraht der Zelle 0 verursacht sind.

Aus dem Verhältnis der im gleichen Zeitraum an Zählwerk 2 und Zählwerk 3 gemessenen

Signale berechnet sich die Übersprech–Zählrate zu

$$X_{\mathrm{Z}} = \frac{N_{\mathrm{Nachbarzelle}}}{N_{\mathrm{Signalzelle}}} \quad . \tag{4.2}$$

An den drei Quellenpositionen, für die in Tabelle 4.2 die Übersprech–Amplitude angegeben ist, wurde auch deren Einfluß auf die Zählrate untersucht. Die Ergebnisse der mit ARGUS– und mit ASD8B–Elektronik durchgeführten Messungen sind in den folgenden Abbildungen 4.16 bis 4.23 für verschiedene Spannungen dargestellt; aufgetragen ist jeweils das Übersprechen X_{Z} in Abhängigkeit von der Schwelle für die drei oben genannten Quellenpositionen. Die eingetragenen Fehler ergeben sich aus den statistischen Fehlern der Zählraten; dabei lag $N_{\mathrm{Signalzelle}}$ zwischen 10 000 und 13 000.

Die Übersprech–Zählrate zeigt bei beiden Verstärkern ein ähnliches Verhalten; sie nimmt mit sinkender Spannug und mit steigender Schwelle ab. Wie bei der Übersprech–Amplitude sieht man auch hier eine Abhängigkeit von der Quellenposition.

4.3.2 Messungen an den Kammern des Testlauf '96

Da die Struktur der Kammern, die im Testlauf '96 verwendet werden sollen, von der der bisher benutzten Testkammern abweicht, ist hier von Interesse, wie hoch das beim Testlauf zu erwartende Übersprechen sein wird. Die Kammern sind jeweils einen Meter lang und bestehen aus zwei übereinander gebauten Einfachlagen (siehe Abbildung 4.24), wobei jede in einem inneren und einem äußeren Sektor sensitiv ist, wie es auch im wirklichen Detektor geplant ist. Dadurch ist die Kammer in insgesamt vier Sektoren unterteilt — in Abbildung 4.24 ist nur eine Hälfte dargestellt. Dabei zeigt der obere Teil der Abbildung einen Längsschnitt durch zwei übereinanderliegende Zellen. Auf der Ausleseseite sind die Signaldrähte mit der Hochspannungsplatine verbunden (siehe auch Anhang B.1). Dort wird zum einen über einen 1 MΩ–Widerstand und einen Tiefpass die Hochspannung angelegt und zum anderen das Signal über einen 330 pF–Hochspannungskondensator ausgekoppelt und über 25 cm lange Twisted–Pair–Kabel zu den ASD8B–Verstärkerkarten geführt. Jeweils 16 Kanäle einer Einfachlage sind über ein solches Kabel mit einem Verstärker verbunden, so daß die Auslese der inneren und der äußeren Sektoren über unterschiedliche Verstärker geschieht.

Bei einer der Kammern des Testlauf '96 wurde die Zählrate des Übersprechens auf benachbarte Zellen eines anderen Sektors untersucht. Gemessen wurde bei 2285 V, wobei alle Signaldrähte auf Hochspannung lagen. Der Schaltkreis der Triggerbedingung entspricht Abbildung 4.14. Zu unterscheiden sind hier zwei Fälle:

1. Fall: Die Zelle I.0 des inneren Sektors wird mit der Quelle bestrahlt und das Zählraten–Übersprechen auf die im äußeren Sektor sensitiven Nachbarzellen A.0 und A.2 untersucht.

2. Fall: Die Zelle A.0 des äußeren Sektors wird bestrahlt und die Zählraten der Nachbarzellen des inneren Sektors I.0 und I.2 bestimmt. In diesem Fall wurden teilweise auch die Nachbarzellen von Elektronen durchflogen. Da aber an dieser Stelle der Zellen 75 μm–Draht gespannt ist, entsteht hier kein Signal; dies liegt an der bei dieser Spannung um vier Größenordnungen geringeren Gasverstärkung im Vergleich zu 25 μm–Draht.

Ergebnisse sind in Abbildung 4.25 dargestellt. Das Übersprechen auf die zweiten Nachbarzellen A.2 bzw. I.2 stimmt innerhalb der Schwellenvariationen der ASD8B–Kanäle mit dem dargestellten überein.

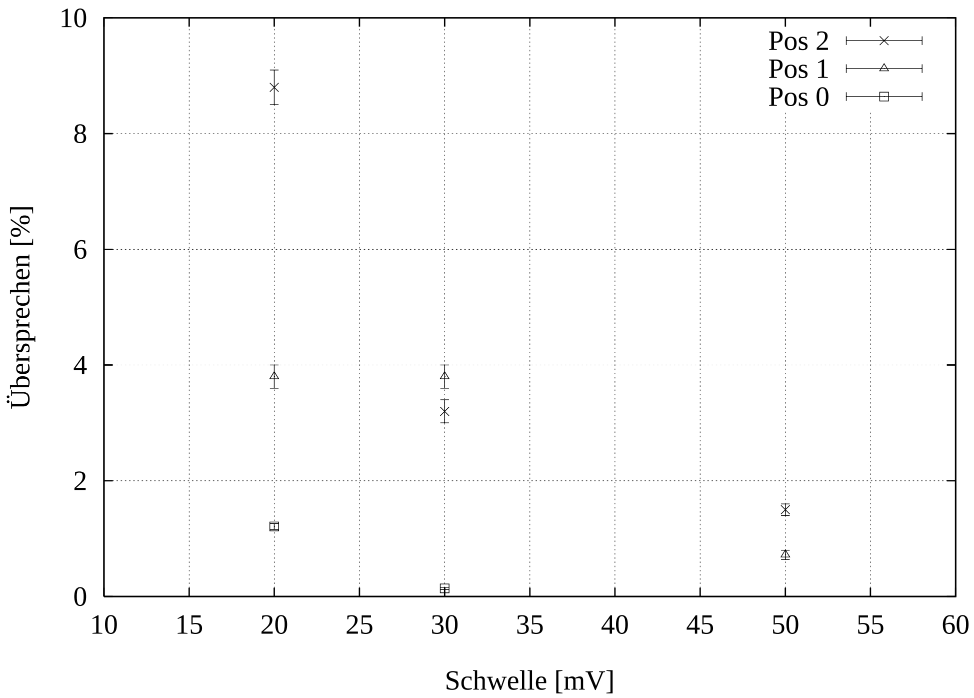

Abbildung 4.16: Mit ARGUS–Elektronik gemessenes Übersprechen X_Z bei einer Hochspannung von 2300 V.

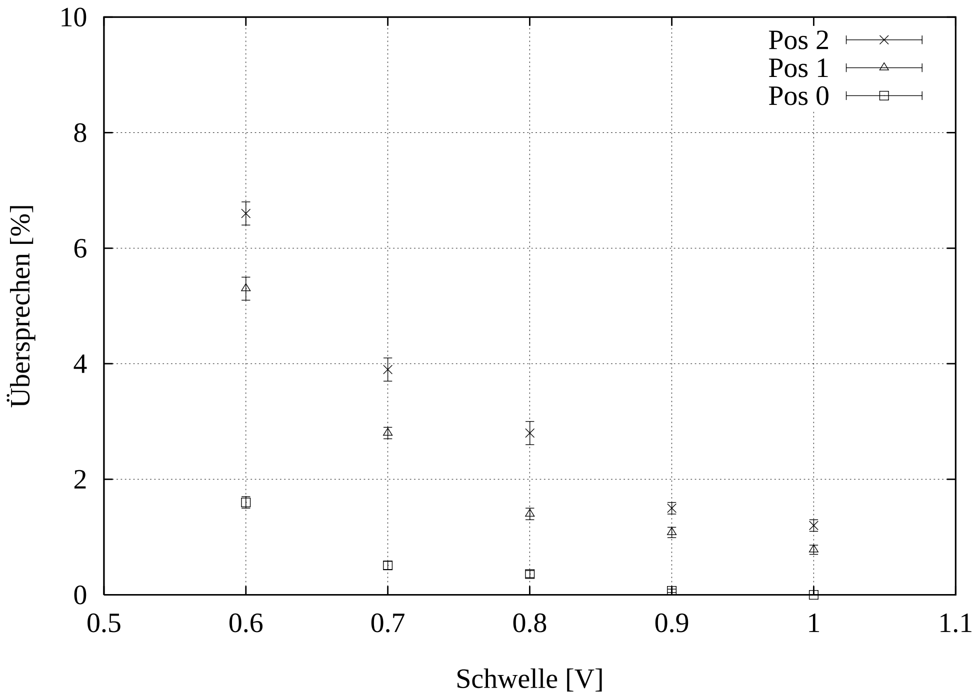

Abbildung 4.17: Mit ASD8B–Elektronik gemessenes Übersprechen X_Z bei einer Hochspannung von 2300 V.

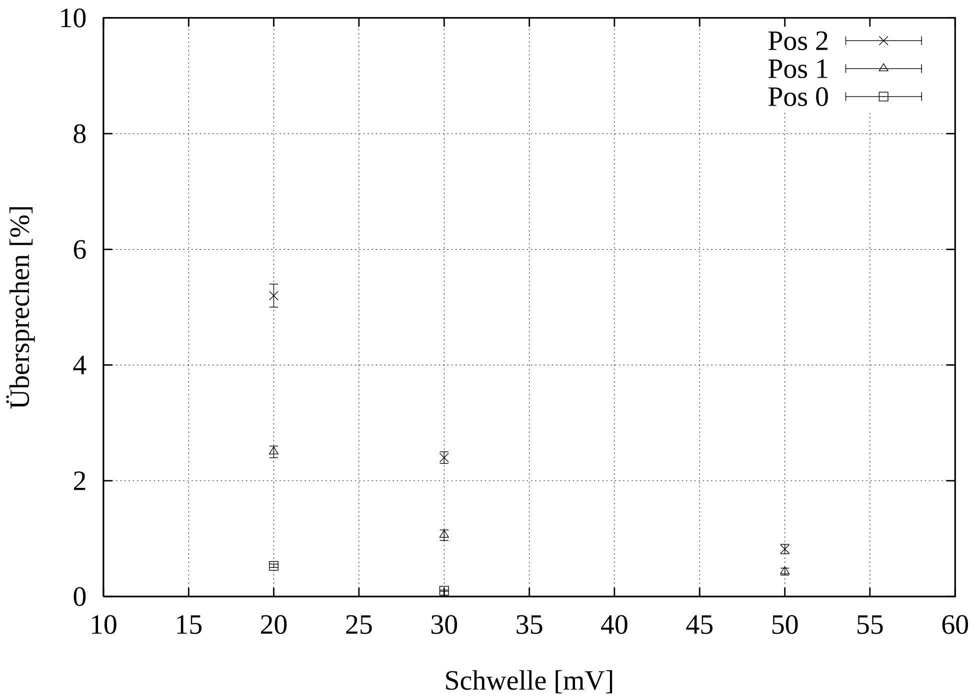

Abbildung 4.18: Mit ARGUS–Elektronik gemessenes Übersprechen X_{Z} bei einer Hochspannung von 2250 V.

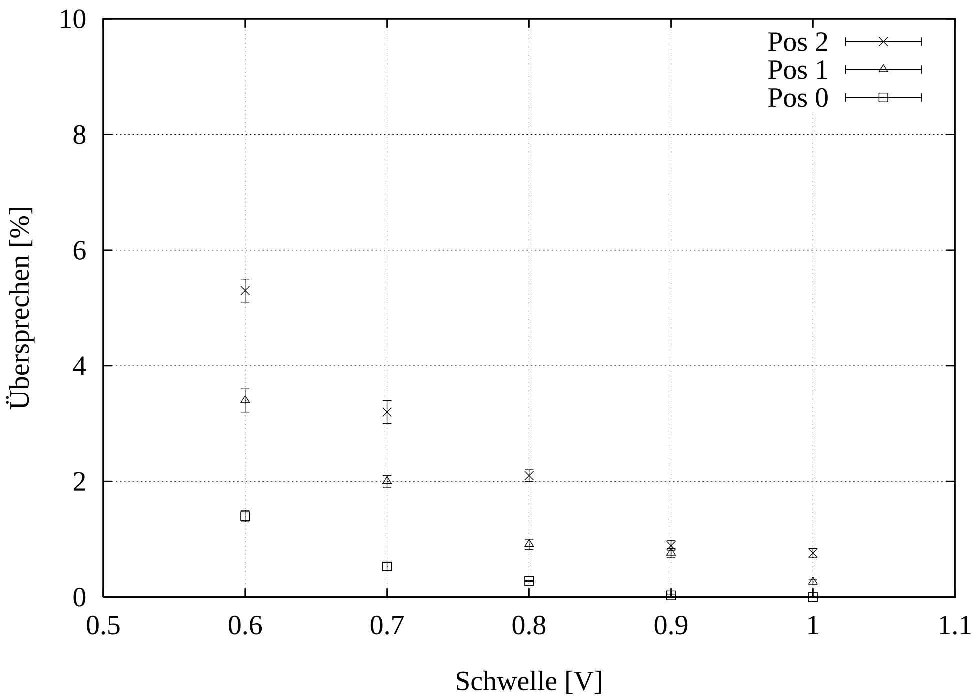

Abbildung 4.19: Mit ASD8B–Elektronik gemessenes Übersprechen X_{Z} bei einer Hochspannung von 2250 V.

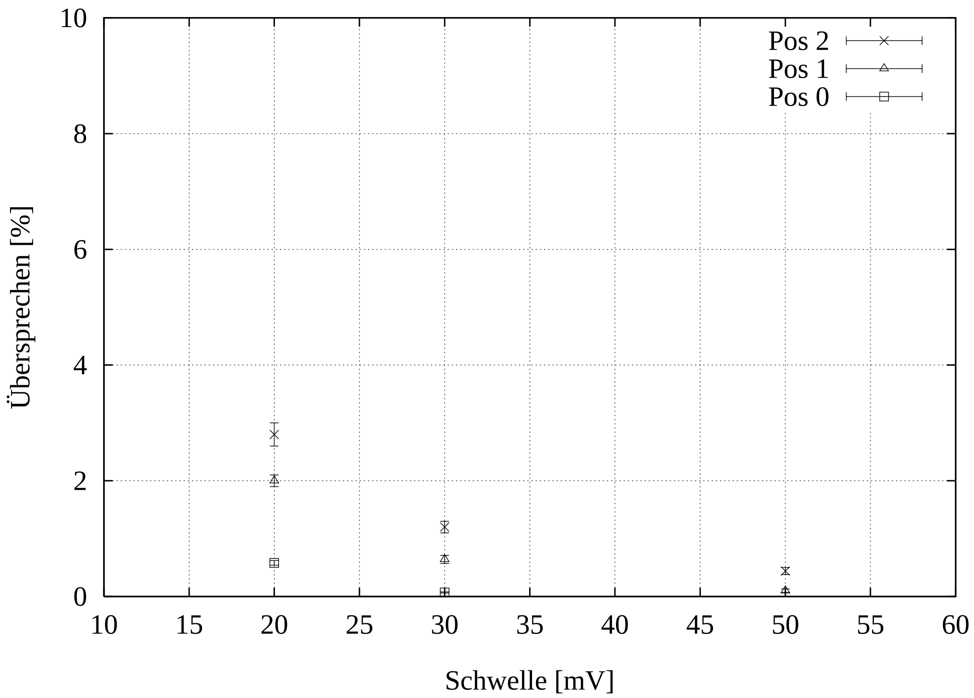

Abbildung 4.20: Mit ARGUS–Elektronik gemessenes Übersprechen X_{Z} bei einer Hochspannung von 2200 V.

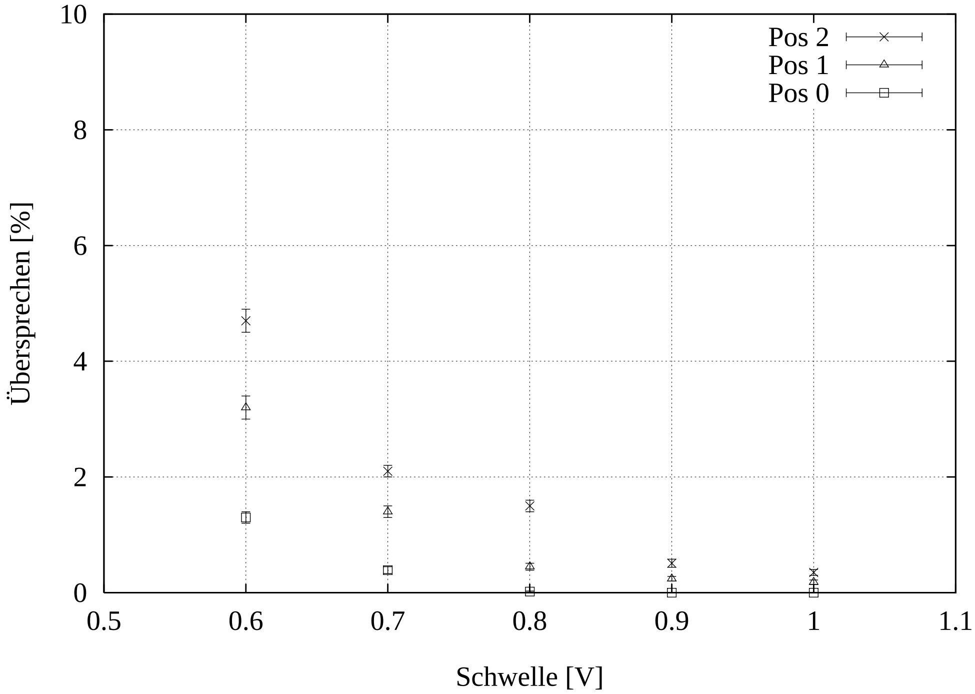

Abbildung 4.21: Mit ASD8B–Elektronik gemessenes Übersprechen X_{Z} bei einer Hochspannung von 2200 V.

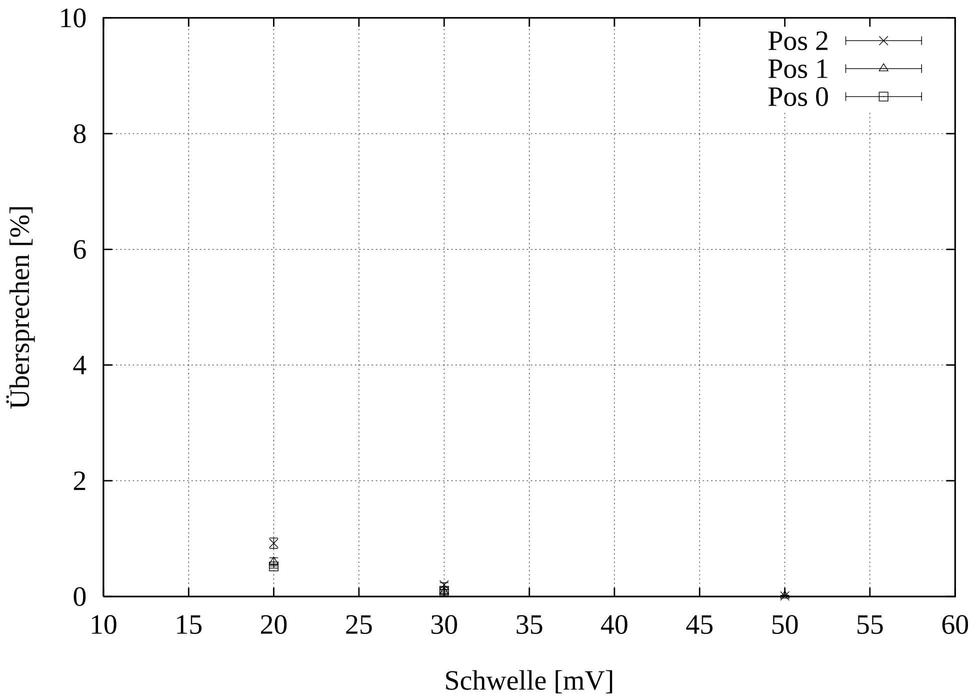

Abbildung 4.22: Mit ARGUS–Elektronik gemessenes Übersprechen X_Z bei einer Hochspannung von 2100 V.

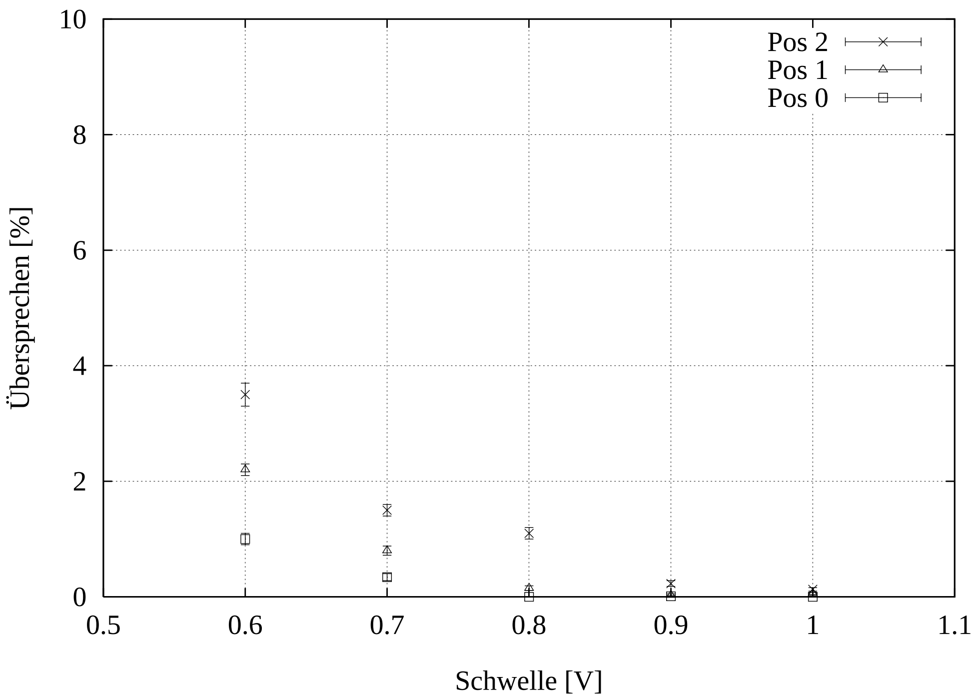

Abbildung 4.23: Mit ASD8B–Elektronik gemessenes Übersprechen X_Z bei einer Hochspannung von 2100 V.

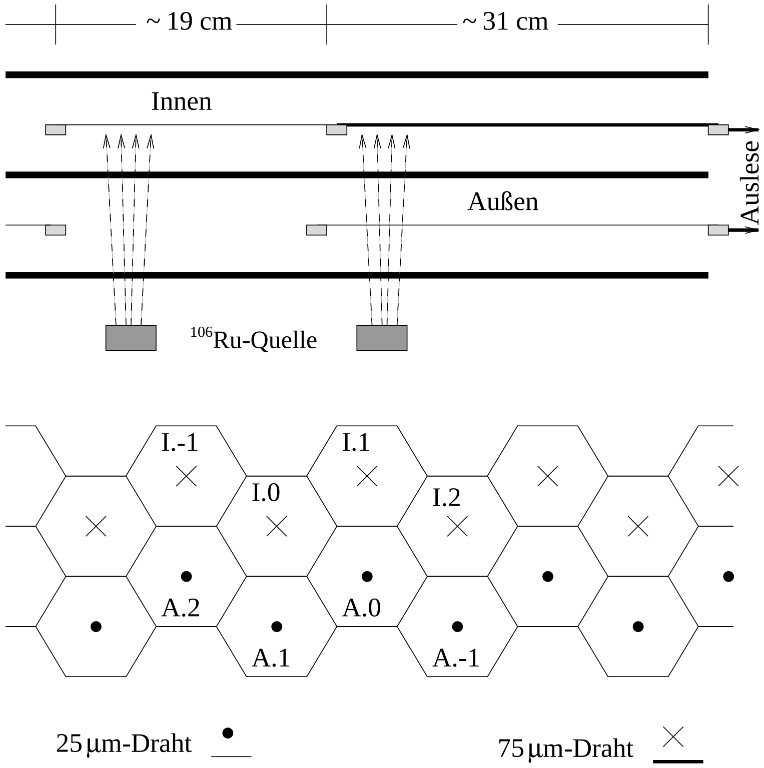

Abbildung 4.24: Sektoren der Kammern des Testlauf '96.

Mit einer weiteren Kammer gleicher Struktur wurde das Übersprechen auf Nachbardrähte desselben Sektors wie des Signaldrahtes untersucht. Dies sind die zwei weiteren Fälle:

3. Fall: Übersprechen auf Zellen innerhalb des innen sensitiven Sektors — gemessen wurde von Zelle I.0 auf die Nachbarzellen I.1 und I.-1.

4. Fall: Übersprechen zwischen außen sensitiven Zellen, von Zelle A.0 auf die Nachbarzellen A.1 und A.-1.

Die Ergebnisse hierzu sind in den Abbildungen 4.26 und 4.27 dargestellt. Um Gasverstärkung an den Nachbardrähten zu verhindern, war bei diesen Messungen nur an den Zellen I.0 und A.0 eine Spannung von 2250 V angelegt; hier wurden alle Zellen über eine ASD8B–Verstärkerkarte ausgelesen.

Von der Konstruktion der Kammer her liegen die Zellen A.1 und A.-1 absolut symmetrisch zu A.0, ebenso ist es bei I.1 und I.-1 zu I.0. Dennoch existiert in beiden Fällen ein Unterschied im Übersprechen auf die zwei Nachbarzellen im Bereich einer Größenordnung. Dies konnte nicht durch etwaige Schwellenvariationen zwischen den Kanälen auf dem ASD8B–Chip erklärt werden. Auch ein Übersprechen auf der ASD8B–Verstärkerkarte konnte durch eine Messung, bei der nur der Signaldraht mit dem Verstärker verbunden war, ausgeschlossen werden. Daher lag die Vermutung nahe, daß der Unterschied in der Zuordnung der Kanäle auf dem 25 cm langen Twisted–Pair–Kabel zwischen Hochspannungsplatine und Verstärkerkarte liegt. Auf den letzten 3 cm vor dem Stecker verliefen diese Kabelpaare nicht mehr verdrillt, sondern parallel. An dieser Stelle liegen die Auslesekabel der Zellen mit großem Übersprechen in unmittelbarer Nähe der Auslesekabel der Signalzellen.

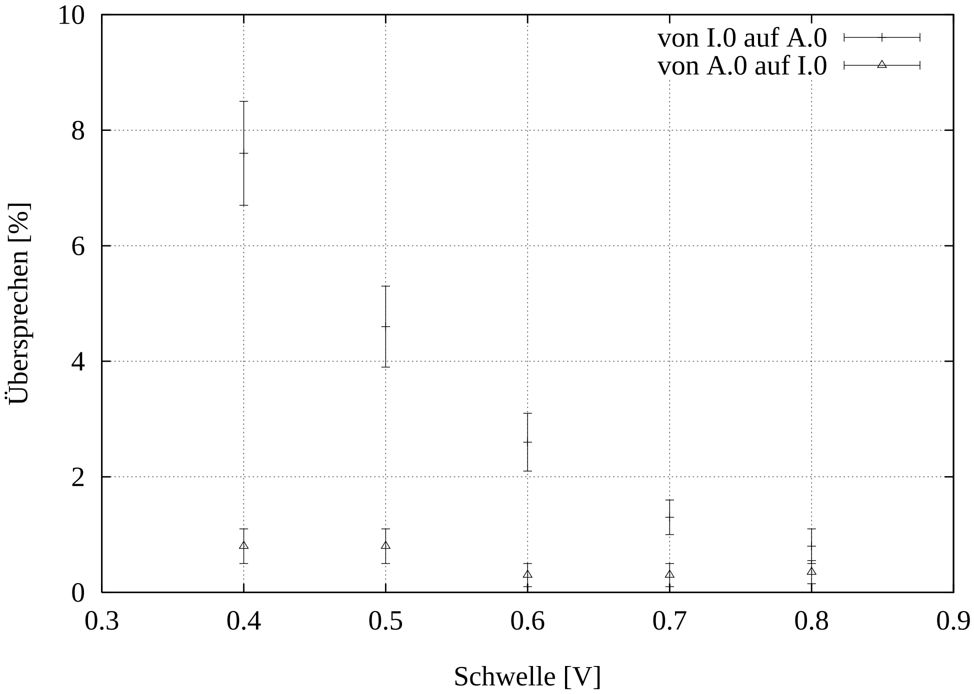

Abbildung 4.25: Übersprechen X_Z auf Nachbarzellen eines anderen Sektors.

Demzufolge geschieht das Übersprechen, welches zu dem großen Unterschied bei zwei symmetrischen Zellen führt, während der Signalausbreitung auf dem Twisted–Pair–Kabel. Dies konnte durch weitere Messungen bestätigt werden, bei denen dieses Kabel durch Koaxialkabel ersetzt war. Dadurch wurde das Übersprechen bei 0.4 V Schwelle auf unter 4 % reduziert [Sou96].

4.4 Zusammenhang von Übersprech–Amplitude und Übersprech–Zählraten

Um einen Zusammenhang zwischen Übersprech–Amplitude und –Zählraten herzustellen, werden die Meßdaten der 1 m langen Einfachlage–Kammer herangezogen. Hier wurden sowohl Amplituden– als auch Zählraten–Messungen unter gleichen Bedingungen durchgeführt. Auch eine Amplitudenverteilung für den Signaldraht bei 2100 V ist vorhanden. Die Amplitude des Übersprech–Signals auf dem Nachbardraht berechnet sich aus $V_{\mathrm{Signaldraht}} \cdot X_{\mathrm{A}}$. Multipliziert man nun das gesamte Amplitudenspektrum am Signaldraht mit X_{A}, so erhält man die Amplitudenverteilung für das Übersprech–Signal bei 2100 V. Beide Verteilungen sind für $X_{\mathrm{A}} = 1.5\,\%$ in Abbildung 4.28 dargestellt; aufgrund der Skalierung ist die schraffierte Amplitudenverteilung der Nachbarzelle am linken Bildrand kaum noch zu erkennen, deswegen ist in der rechten Abbildung ein Ausschnitt der linken mit einer logarithmierten Ordinate gezeigt. Die gestrichelten vertikalen Linien geben den Ort der 20, 30 und 50 mV–Schwelle im Spektrum an. Wenn bekannt ist, wo im Amplitudenspektrum die Diskriminatorschwelle liegt, kann aus den Einträgen, die die Schwelle noch überschreiten, das Zählraten–Übersprechen

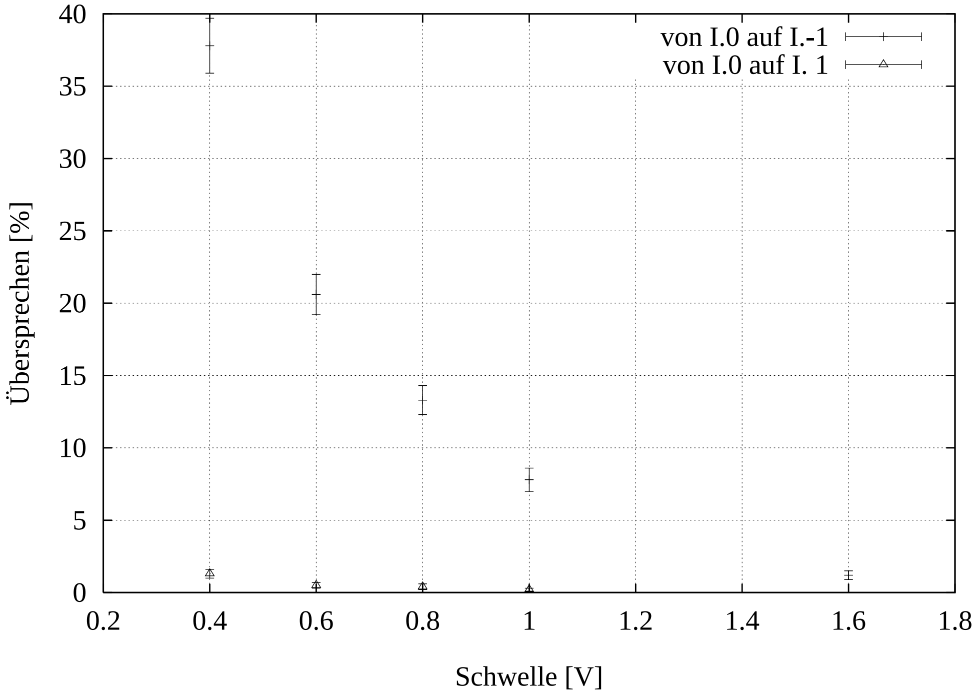

Abbildung 4.26: Übersprechen X_{Z} zwischen Zellen des inneren Sektors.

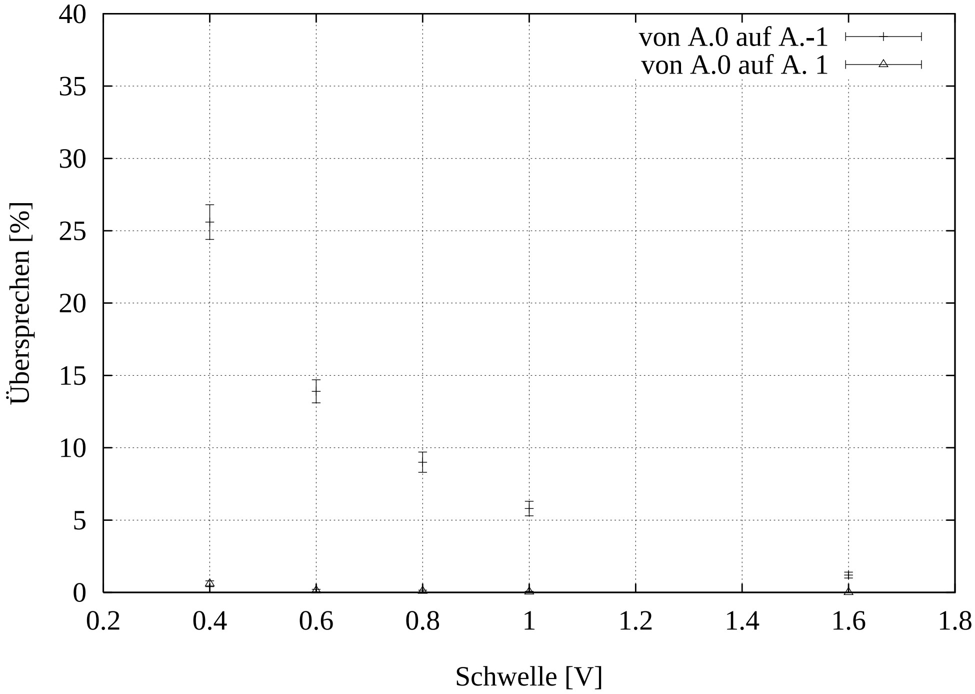

Abbildung 4.27: Übersprechen X_{Z} zwischen Zellen des äußeren Sektors.

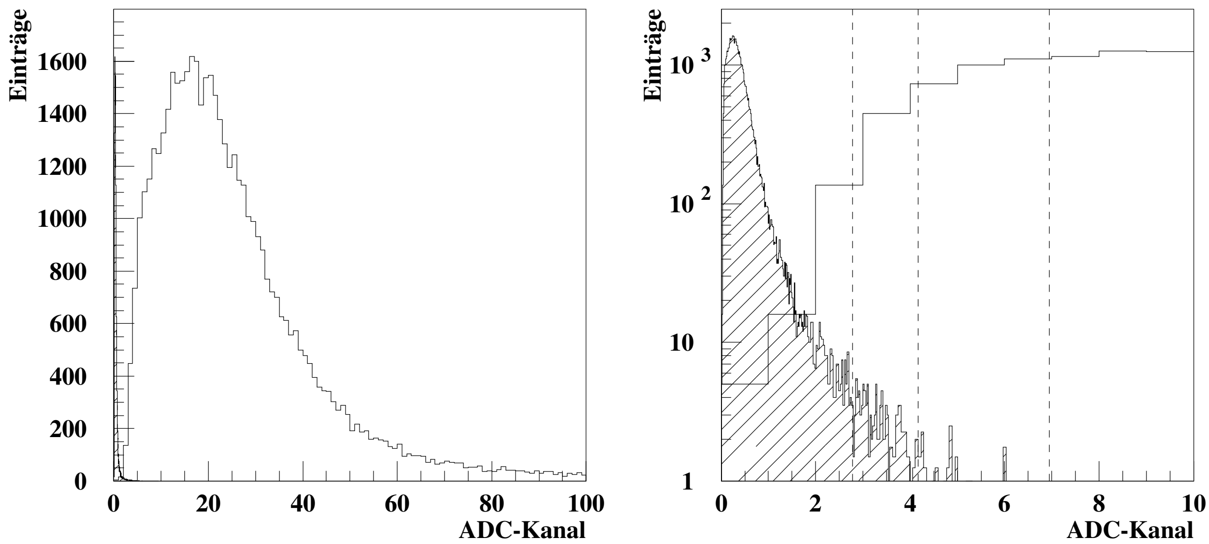

Abbildung 4.28: Gezeigt ist das gemessene Amplitudenspektrum der Signalzelle (weiß) und das daraus berechnete Spektrum der Nachbarzelle (schraffiert). Die rechte Darstellung ist ein Ausschnitt der linken mit logarithmierter Ordinate.

nach

$$X_{\mathrm{Z}} = \frac{\int\limits_{Schwelle}^{\infty} N_{\mathrm{Nachbardraht}}\, dK}{\int\limits_{Schwelle}^{\infty} N_{\mathrm{Signaldraht}}\, dK} \tag{4.3}$$

berechnet werden. Dazu wird bei beiden Spektren über die Kanäle oberhalb der Schwelle integriert.

Will man das Übersprechen auch für andere Hochspannungen berechnen, müssen beide Amplitudenspektren mit einem Verstärkungsfaktor G multipliziert werden. Für die Amplitude des Übersprech–Signals ergibt sich somit

$$V_{\mathrm{Nachbardraht}}(HV, X_{\mathrm{A}}) = V_{\mathrm{Signaldraht}}(2100\,\mathrm{V}) \cdot \mathrm{G(HV)} \cdot \mathrm{X_A} \quad . \tag{4.4}$$

Hierbei wurde G aus dem Verhältnis der mittleren Amplituden $\overline{V}$ berechnet. Diese mittleren Amplituden wurden für einige Spannungen gemessen und in Abbildung 4.29 aufgetragen. Um G auch für die dazwischenliegenden Werte zu berechnen, wurde ein Polynom 5. Grades an die Meßpunkte angepaßt ($1900\,\mathrm{V} \leq\ (HV)\ \leq 2400\,\mathrm{V}$):

$$\begin{aligned} \overline{V}(HV) \;=\;& 7.65643 \cdot 10^4 \cdot (HV)^5 - 7.92241 \cdot 10^5 \cdot (HV)^4 + 3.29169 \cdot 10^6 \cdot (HV)^3 \\ & - 6.85333 \cdot 10^6 \cdot (HV)^2 + 7.14132 \cdot 10^6 \cdot (HV) - 2.97683 \cdot 10^6 \quad . \end{aligned}$$

G berechnet sich nun aus

$$G(HV) = \frac{\overline{V}(HV)}{\overline{V}(2100\,\mathrm{V})} \quad . \tag{4.5}$$

Da der ADC nicht kalibriert war, war auch nicht bekannt, an welcher Stelle im Amplitudenspektrum die Schwellen liegen. Deswegen wurden sie auf umgekehrtem Wege aus den

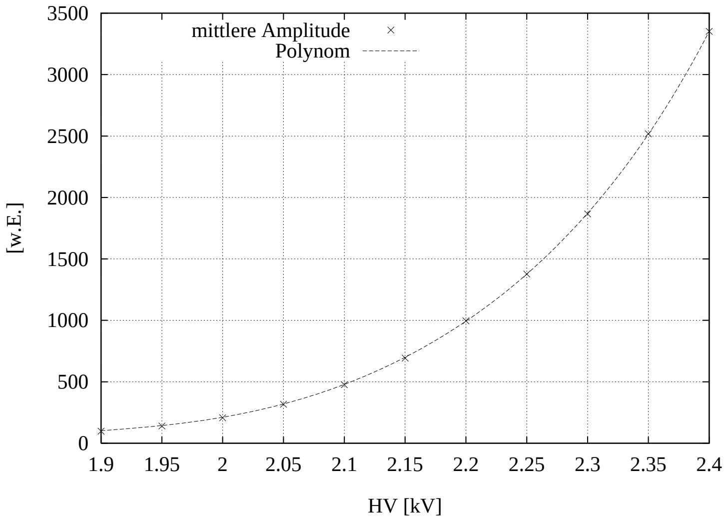

Abbildung 4.29: Mittlere Amplitude in willkürlichen Einheiten für verschiedene Hochspannungen.

Daten der Zählratenmessung bei 2100 V Hochspannung und 20, 30 und 50 mV Schwelle bestimmt. Mit den so ermittelten Schwellen wurde dann das Übersprechen für verschiedene Hochspannungen berechnet und in Abbildung 4.30 mit den gemessenen Daten verglichen. Dargestellt ist als Beispiel das Übersprechen bei 20 mV Schwelle an Pos 2 ($X_{\mathrm{A}} = 1.5\,\%$). Die gestrichelten Linien geben den Fehlerbereich der Berechnung an; dabei ist hier nur der Fehler aus der Schwellenbestimmung berücksichtigt. Die Ursache für die Abweichung des berechneten vom gemessenen Übersprechen liegt vermutlich an der Bestimmung von G aus den mittleren Amplituden. Im nachhinein hat sich herausgestellt, daß es aufgrund des langen Ausläufers des ^{106}Ru–Spektrum günstiger gewesen wäre, anstatt der mittleren Amplituden den Wert des Maximums im Amplitudenspektrum heranzuziehen.

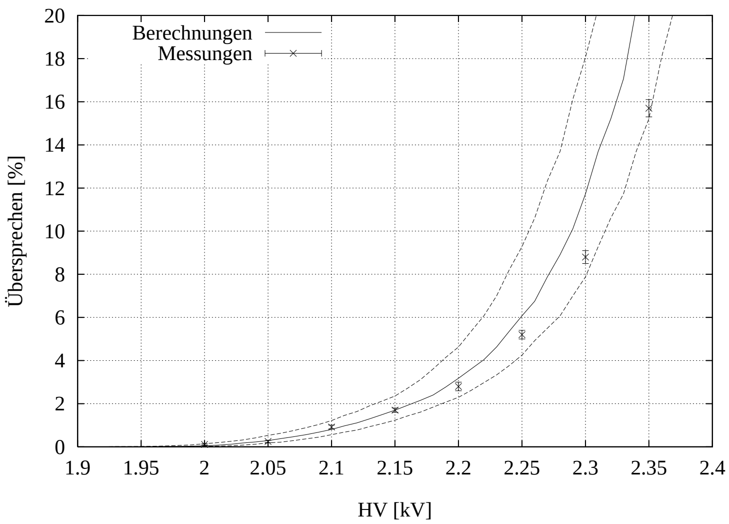

Abbildung 4.30: Vergleich des berechneten mit dem gemessenen Übersprechen X_{Z}.

5 Diskussion und Schlußfolgerungen

5.1 Reflektionen

Aufgrund der bei HERA–B erwarteten hohen Ereignisrate ist eine Unterdrückung der Reflektionen durch idealen Abschluß des Reflektionsendes wünschenswert; denn ein Problem, daß durch die Reflektionen entstehen kann, sind durch das reflektierte Signal verursachte Nachpulse. Aber durch die Strukturierung der Kammern enden die Signaldrähte mitten in den Zellen, wo ein Anbringen von Widerständen und Hochspannungskondensatoren nicht möglich ist.

Der für die Auslese der Wabendriftkammern im HERA–B–Experiment entwickelte Zeit–zu–Digital–Konverter (TDC) wertet nur den ersten Eintrag innerhalb einer Meßperiode von 96 ns. Dadurch sind Nachpulse unkritisch, solange sie nicht in der Meßzeit des nachfolgenden Ereignisses entstehen. Um dies zu vermeiden wurde entschieden, die maximale Signaldrahtlänge auf 2.25 m zu halbieren; dadurch reduziert sich die maximale Signallaufzeit des reflektierten Signals von 32 auf 16 ns.

5.2 Dämpfungslänge

Die Dämpfungslänge wurde sowohl für 10 mm– als auch für 5 mm–Kammern bestimmt. Durch die Dämpfung würde sich die Signalamplitude nach 4.5 m Ausbreitung des Signals durch die Zelle auf 34 % bei den 5 mm– und auf 50 % bei den 10 mm–Kammern reduzieren. Der Unterschied läßt sich dadurch erklären, daß die 10 mm–Kammern aufgrund ihrer größeren Ausdehnung (bei gleichem Drahtradius) aus mehr leitfähigem Material bestehen; somit hat ihr Außenleiter einen geringeren Widerstand entlang der Zelle, was eine verringerte Dämpfung zur Folge hat.

Die oben erwähnte Halbierung der Signaldrahtlänge hat auch einen positiven Einfluß auf die Dämpfung: die Amplitude reduziert sich bei Signalausbreitung über die maximale Drahtlänge von 2.25 m nur auf 59 % bei 5 mm– und 70 % bei 10 mm–Kammern.

5.3 Ausbreitungsgeschwindigkeit

Da der Durchgangsort der Teilchen nur aus der Zeitinformation des digitalen Signals bestimmt wird, muß die Ausbreitungsgeschwindigkeit des Signals bei der Spurrekonstruktion mit berücksichtigt werden. Bei bis zu 2.25 m langen Signaldrähten ergibt sich daraus schon ein Zeitunterschied von etwa 8 ns. Aus dem Meßfehler der Ausbreitungsgeschwindigkeit von 1–2 % resultiert eine Ortsunsicherheit von 10–20 μm. Dieser Fehler kann bei einem erwarteten Auflösungsvermögen von etwa 200 μm vernachlässigt werden.

5.4 Übersprechen

Die Amplitude des Übersprech–Signals bei der 2 m langen 5 mm–Kammer war abhängig von der Quellenposition und hatte einen Maximalwert von etwa 6 %. Durch das Anbringen von leitfähigen Deckfolien verschwand die Positionsabhängigkeit und die Übersprech–Amplitude konnte auf 2–3 % gesenkt werden. Da das Übersprechen auf eine so einfache Weise um mehr als 50 % reduziert werden kann wurde beschlossen, beim endgültigen HERA–B–Detektor alle Wabendriftkammern mit Deckfolien zu versehen.

Die Übersprech–Amplitude bei 2.25 m langen Drähten der mit Deckfolien versehenen 10 mm–Kammer ist mit 4–5 % höher als bei der mit 2 m Länge etwa gleichlangen 5 mm–Kammer. Für 4.5 m lange Drähte liegt das Übersprechen zwischen 3 und 4 %. Bei vorhandener Deckfolie konnte keine weitere signifikante Reduzierung des Übersprechens durch die zusätzlichen Drähte zwischen den Folien festgestellt werden.

Der quantitative Zusammenhang zwischen Übersprech–Amplitude und Übersprech–Zählrate konnte in Abhängigkeit von der angelegten Spannung und der Diskriminatorschwelle aufgezeigt werden. Die Übersprech–Zählrate kann durch eine höhere Schwelle und/oder niedrigere Hochspannung gesenkt werden. Dabei ist allerdings zu beachten, daß durch zu hohe Schwellen und zu niedrige Spannungen die Effizienz der Kammern gesenkt wird [Dec96]. Ein geeigneter Arbeitspunkt für 5 mm–Kammern liegt bei 2150 V Hochspannung mit einer ASD8B–Schwelle von etwa 1.0 V entsprechend einer Ladung von 4 fC; bei diesen Einstellungen ist die Effizienz der Kammern noch größer als 99 % [Sou96].

Bei den Kammern des Testlauf'96 war das Übersprechen auf benachbarte Zellen des gleichen Sektors besonders hoch. Beim Testlauf kann nun untersucht werden, ob das Übersprechen durch eine geeignete Einstellung von Hochspannung und Schwelle weit genug unterdrückt werden kann, ohne die Effizienz unter das geforderte Limit von 98 % zu senken. In jedem Fall sollen für den endgültigen HERA–B–Detektor noch Verbesserungen an dem Verbindungskabel (Twisted–Pair) zwischen HV–Platine und ASD8B–Karte vorgenommen werden: die Länge dieser Kabel soll von 25 auf 10 cm gekürzt und der Bereich paralleler Drahtführung vor dem Stecker so kurz wie möglich gehalten werden. Außerdem wird die Anordnung der Kanäle auf dem Kabel derart sein, daß keine signalführenden Kabel mehr direkt nebeneinander verlaufen.

6 Zusammenfassung

In dieser Arbeit wurde untersucht, welchen Einfluß die Pokalon–C–Folie auf die Signalausbreitung und auf das Übersprechen hat. Die Ergebnisse sind hier kurz zusammengefaßt:

- Der Wellenwiderstand der 5 mm–Kammer wurde zu

  $$Z_0 = (330 \pm 30)\,\Omega$$

  bestimmt. Dieser Wert stimmt im Rahmen des Fehlers mit dem durch eine Näherung bestimmten theoretischen Wert von $318\,\Omega$ überein.

- Die Dämpfungslänge λ wurde für beide Zellgrößen gemessen; sie ergibt sich zu

  $$\lambda_{5\,\mathrm{mm}} = (4.2 \pm 0.3)\,\mathrm{m}$$

  und

  $$\lambda_{10\,\mathrm{mm}} = (6.4 \pm 0.3)\,\mathrm{m} \quad .$$

- Die Ausbreitungsgeschwindigkeit für 10 mm–Kammern mit Deckfolie beträgt

  $$v_{10\mathrm{mm}} = (0.92 \pm 0.01)\ c \quad .$$

  Für 5 mm Zellgröße gilt

  $$v_{5\mathrm{mm}} = (0.94 \pm 0.02)\ c$$

  bei Kammern mit Deckfolie; ohne Deckfolie beträgt die Ausbreitungsgeschwindigkeit nur

  $$v'_{5\mathrm{mm}} = (0.89 \pm 0.02)\ c \quad .$$

- Die Amplitude des Übersprech–Signals konnte durch das Aufbringen von Deckfolien um 50 % reduziert werden. Die Zählrate des Übersprechens nimmt mit steigender Übersprech–Amplitude, steigender Hochspannung und fallender Schwelle zu.

Diese Meßergebnisse sind auch die Grundlage für einige Entscheidungen, die die Konstruktion der Kammern für den endgültigen HERA–B–Detektor betreffen. So wurde beschlossen, zur Verminderung des Übersprechens alle Kammern mit Deckfolien zu versehen. Außerdem wird die maximale Signaldrahtlänge 2.25 m betragen; durch Auslesen der 4.5 m langen Zellen an beiden Enden werden die Kammern dennoch auf ganzer Länge sensitiv sein. Desweiteren werden für die endgültige Form der Wabendriftkammern noch Veränderungen an den Verbindungskabeln zwischen HV–Platine und Verstärkerkarte vorgenommen. Außerdem helfen die in dieser Arbeit aufgeführten Untersuchungen zum Übersprechen dabei, die beim Testlauf '96 und bei Messungen mit kosmischen Myonen gewonnenen Daten zu verstehen.

A Ausleseelektronik

Die in dieser Arbeit beschriebenen Messungen wurden mit zwei unterschiedlichen Systemen durchgeführt. Soweit wie möglich wurde das auf dem ASD8B–Chip basierende System benutzt, wie es auch im Testlauf '96 und für den endgültigen Detektor vorgesehen ist. Immer wenn es darum ging, Informationen über die Signalform und -amplitude zu erhalten, wurde auf die Ausleseelektronik der ARGUS–Vertexkammer zurückgegriffen, da die ASD8B–Verstärkerkarte nicht für Analogmessungen ausgelegt ist.

A.1 ARGUS–Vertexkammer–Elektronik

Dieses Verstärkersystem ist an der Universität Dortmund für die Microvertex–Driftkammer des ARGUS–Detektors am DESY Hamburg entwickelt worden [Mic89]. Es besteht aus Vor- und Hauptverstärkern.

Die stromsensitiven Vorverstärker befinden sich auf $53.5 \times 43.0\,\mathrm{mm}^2$ großen Karten. Auf einer Vorverstärkerkarte sind jeweils acht Kanäle zusammengefaßt; einige wesentliche Merkmale sind in Tabelle A.1 angegeben. Die differenzierten Signale werden über ein abgeschirmtes Twisted–Pair–Kabel zum Hauptverstärker geführt. Sowohl das Verdrillen zweier Kabel („Twisted–Pair“) als auch die Metallabschirmung verringern den Einfang zusätzlichen Rauschens. Auch die Hauptverstärker sind zu acht Kanälen auf einer Platine zusammengefaßt. Jeder Hauptverstärker besteht aus vier Komponenten, die in [Mic89] näher erläutert werden. Bei den für diese Arbeit durchgeführten Messungen wurde nur der Analogverstärker benutzt; das verstärkte Signal wurde auf LEMO–Buchsen abgegriffen. Die wichtigsten Eigenschaften des Hauptverstärkers sind in Tabelle A.2 angegeben.

Tabelle A.1: Wesentliche Merkmale eines ARGUS–Vorverstärkerkanals.

Anstiegszeit (10–90 %)	3.9 ns
Empfindlichkeit	4 mV/μA
Eingangsimpedanz	100 – 140 Ω
Ausgangsimpedanz	100 Ω
Verlustleistung	24 mW/Kanal

Tabelle A.2: Wesentliche Merkmale eines ARGUS–Hauptverstärkerkanals.

Spannungsverstärkung	25
Eingangsimpedanz	100 Ω
Ausgangsimpedanz (Analog)	50 Ω
Verlustleistung	1.25 W/Kanal

A.2 Verstärker ASD8B

Der ASD8B–Chip wurde an der University of Pennsylvania für das zentrale Spursystem des SDC–Detektors entwickelt [New93]. Auf diesem $2.8 \times 4.7\,\mathrm{mm}^2$ großen Silizium–Chip befinden sich acht Kanäle einer Kette bestehend aus ladungsensitivem Verstärker, Signalformer und Diskriminator.

Der ASD8B wurde für das Auslesesystem der Äußeren Spurkammern von HERA–B gewählt, weil er die Anforderungen eines Hochratenexperimentes erfüllt: er hat eine geringe Signalformungszeit und eine gute Doppelsignalauflösung. Desweiteren sind seine niedrige Arbeitsschwelle und Verlustleistung von Vorteil. Mit 18 mW pro Kanal liegt sie um fast zwei Größenordnungen unter der Verlustleistung der ARGUS–Elektronik, was bei ca. 120 000 Kanälen ein bedeutender Faktor ist. Die Eigenschaften des ASD8B–Chips sind in Tabelle A.3 aufgetragen.

Tabelle A.3: Wesentliche Merkmale des ASD8B–Chips.

Signalformungszeit	$\approx$ 5 ns
Doppelsignalauflösung	$\approx$ 20 ns
Arbeitsschwelle	$\approx$ 1 fC
Eingangsimpedanz	$\approx 125\,\Omega$
Verlustleistung	$\approx$ 18 mW/Kanal

Am DESY–Institut für Hochenergiephysik in Zeuthen wurde eine auf dem ASD8B basierende Verstärkerkarte entwickelt. Sie beinhaltet zwei Chips und somit zusammen sechzehn Kanäle. Der Schaltplan dieser $56 \times 66\,\mathrm{mm}^2$ großen Karte ist in Abbildung A.1 dargestellt. Sie wird im Experiment direkt von außen auf den Gasbehälter gesteckt. Der Ausgang der Verstärkerkarte ist über Twisted–Pair–Kabel direkt mit der weiteren Auslesekette verbunden.

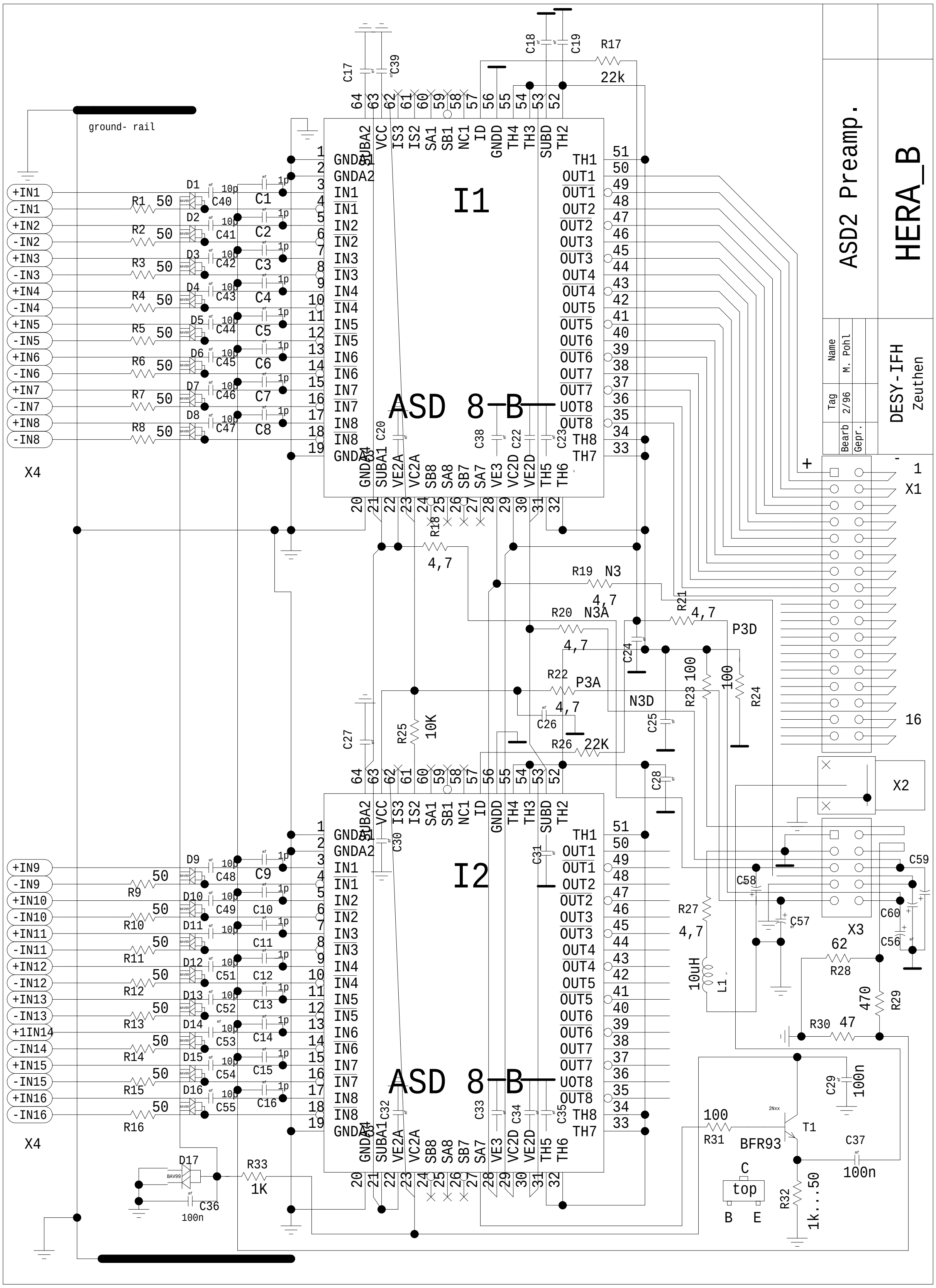

Abbildung A.1: Schaltkreis der Verstärkerkarte mit zwei ASD8B–Chips.

B Kammern des Testlauf '96

Für den Testlauf '96 wurden am DESY–Institut für Hochenergiephysik in Zeuthen neun Wabendriftkammern mit 5 mm Zellgröße gebaut. Unter realen Bedingungen sollen die Kammern selbst, aber auch das Auslesesystem getestet werden. In jeder von drei sogenannten Mini–Superlagen ist eine Kammer in vertikaler Richtung (0°) und zwei weitere unter einem Winkel von $\pm 5^\circ$ dazu angeordnet. Alle neun Kammern haben Doppellagen–Struktur und sind 1 m lang. Wie auch für den endgültigen Detektor vorgesehen sind sie mit Deckfolien (40 μm–Aluminiumfolie bzw. kupferbeschichteter Pokalon–C–Folie) beklebt und in innere und äußere Sektoren unterteilt. Diese mit 25 μm–Draht sensitiven Sektoren sind so angeordnet (siehe Abbildung B.1 (a)), daß die gesamte Kammerfläche sensitiv ist. Die in inneren

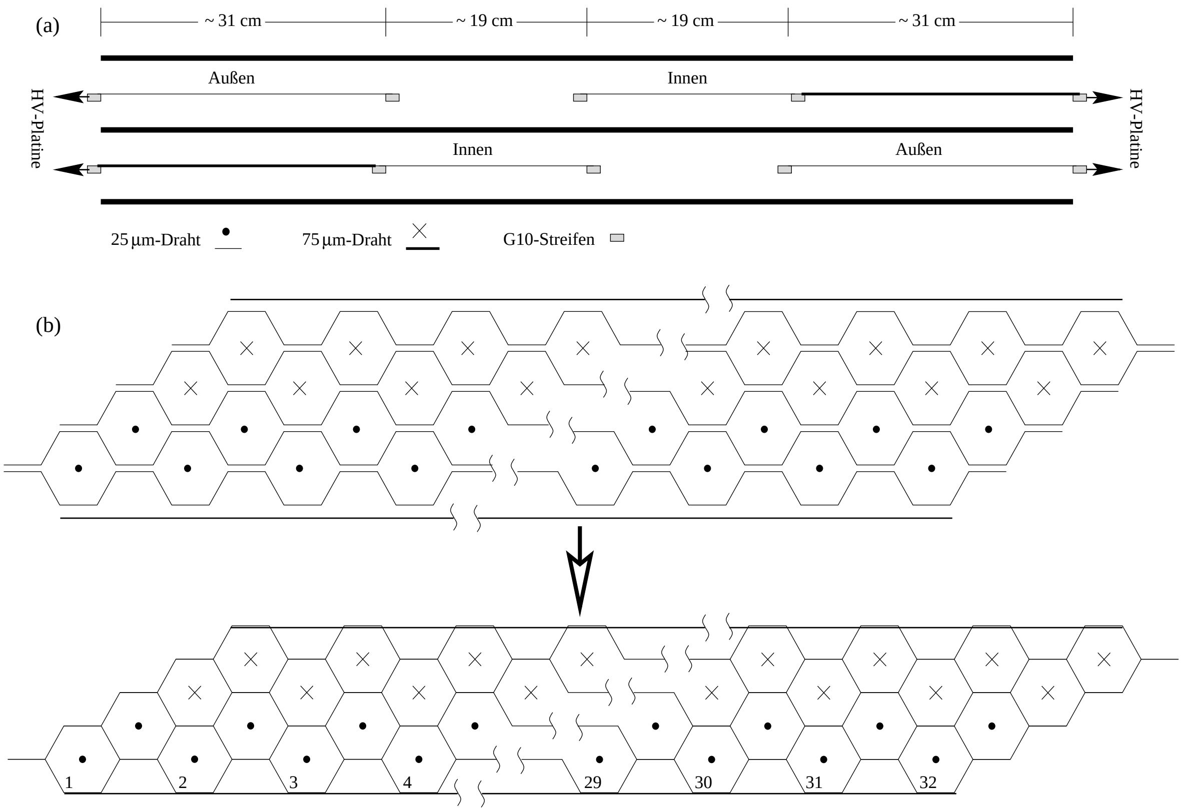

Abbildung B.1: Schnitt durch zwei übereinanderliegende Zellen (a) und durch die gesamte Kammer im außen sensitiven Bereich (b).

Sektoren entstehenden Signale werden ausgelesen, indem sie über 75 μm dicken Draht nach außen geleitet werden. Über diesen Draht sind sie auch mit der Hochspannung verbunden. Befestigt sind die Drähte auf G10–Streifen, die innerhalb der Kammer senkrecht zu den Drähten zwischen die Folien geklebt werden. Außerhalb der Kammer sind die G10–Streifen auf sogenannten Endstücken befestigt. Von diesen äußeren Streifen aus sind die Signaldrähte mittels kurzer Kabel mit der HV–Platine (Abbildung B.2) verbunden. Sie dient zur Verteilung der Hochspannung auf die Drähte (jeweils sechzehn Drähte pro HV–Zuleitung) über einen Tief-

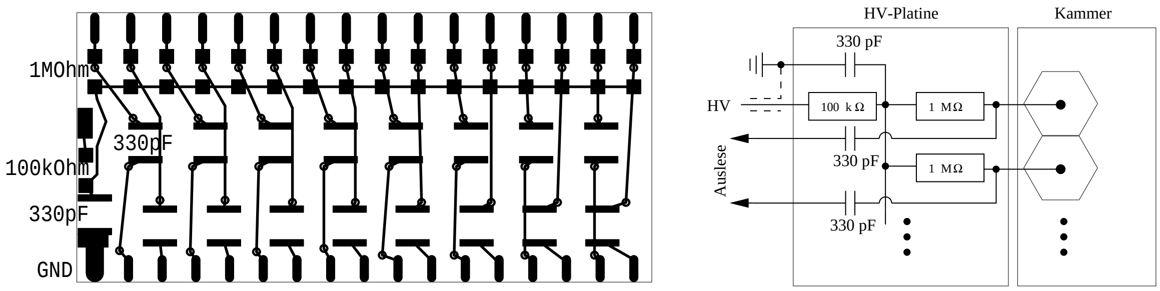

Abbildung B.2: Leiterplatten–Layout (links) und Schaltbild (rechts) der HV–Platine.

paß. Auch das Auslesen der Signale erfolgt über diese Platine, auf der die Signaldrähte über Hochspannungskondensatoren mit den Auslesekabeln verbunden sind. Über diese 25 cm langen Twisted–Pair–Kabel werden die Signale bis zur Steckerleiste des Gasbehälters geführt. Von außen werden auf diese Steckerleisten die ASD8B–Verstärkerkarten gesteckt, auf denen das analoge Signal in ein digitales umgewandelt und über weitere Twisted–Pair–Kabel an die Ausleseelektronik weitergeleitet wird. Da jede Wabenzelle zu beiden Seiten hin ausgelesen wird, ergibt sich bei 128 Zellen pro Kammer eine Gesamtzahl von 2304 Auslesekanälen.

B.1 Kammerbau

Wie in Abbildung B.1 (b) dargestellt, wurden die Kammern des Testlauf '96 aus jeweils fünf vorgefalteten Pokalon–C–Folien zusammengeklebt. Jede Folie hatte eine Länge von einem Meter und eine Breite von 32 Zellen. Gebaut wurde von unten nach oben: auf die erste Folie wurden zuerst die G10-Streifen geklebt. Darüber wurden dann mit 73 g schweren Gewichten der Draht gespannt und festgelötet. Um diese Lötstellen gegen die nachfolgende Folie zu isolieren, wurde sie mit Kleber überstrichen. Danach konnte die nächste Folie darübergeklebt werden. Diese Prozedur wurde bis zur letzten Lage wiederholt. Zum Kleben wurde ein beim Kammerbau üblicher Zweikomponentenkleber (Araldite) verwendet. Um zwischen den Folien elektrischen Kontakt zu erzeugen, wurde etwa alle 10 cm eine kleine Klebestelle mit Silberleitkleber zugefügt.

Bevor eine Drahtlage jedoch durch Aufbringen der nächsten Folie unzugänglich wurde, mußte eine angemessene Drahtspannung gewährleistet sein. Drahtspannungen über der Fließgrenze können den Radius des Drahtes und somit das elektrische Feld ändern; auf das Fließverhalten des verwendeten Drahtes wird in [Sch96] genauer eingegangen. Zu gering gespannte Drähte können dagegen durchhängen; dies kann durch das beim Anlegen der Hochspannung entstehende elektrische Feld soweit verstärkt werden, daß der Draht die Folie berührt und somit einen Kurzschluß verursacht. Aus diesen Gründen wurden Drahtspannungsmessungen durchgeführt, die in Abschnitt B.2 ausführlich beschrieben werden. Waren die Drahtspannungen in Ordnung bzw. schlecht gespannte Drähte ausgewechselt, wurde die nächste Folie aufgeklebt und somit die Zellen geschlossen.

Nach dem Anbringen der letzten Folie wurden die Kammern unten und oben mit einer Deckfolie beklebt. Diese Deckfolie dient, wie in Kapitel 4.2 gezeigt wurde, der Reduzierung des Übersprechens. Der letzte Schritt der Kammerproduktion war das Anbringen der Hochspannungsplatinen und der Auslesekabel. Nach Abschluß der Produktion erfolgte noch das Hochspannungstraining und die Qualitätskontrolle, die in den Abschnitten B.3 und B.4 beschrieben werden.

B.2 Drahtspannungsmessungen

Zur Bestimmung der mechanischen Drahtspannung wird mit einem Generator ein sinusförmiger Strom durch den Draht geschickt. Durch die im Magnetfeld eines Permanentmagneten auf die bewegten Ladungen wirkende Lorentz–Kraft wird der Draht zum Schwingen angeregt. Im Resonanzfall ergibt sich aus der Resonanzfrequenz bei bekannter Länge und Masse des Drahtes die Drahtspannung aus dem folgenden wohlbekannten Zusammenhang, der z.B. in [Cra79] hergeleitet wird:

$$\nu = \frac{(n+1)}{2L}\sqrt{\frac{T}{M_{Draht}}} \quad . \tag{B.1}$$

Hierbei ist ν die gemessene Eigenfrequenz in [Hz], L die Länge des Drahtes in [m], T die gesuchte Spannung in [N], M die Masse pro Drahtlänge in [kg/m] und n die n–te Oberschwingung (0=Grundschwingung).

Die Resonanzfrequenz wird bestimmt, indem die Frequenz am Generator kontinuierlich erhöht wird, bis die Grundschwingung des Drahtes mit maximaler Amplitude zu sehen ist. Aus diesem Wert wird nach Gleichung (B.1) die Drahtspannung in [g] berechnet. Die bei der Produktion der neun 5 mm–Kammern gemessenen Drahtspannungen der inneren und äußeren Sektoren sind in Abbildung B.3 dargestellt. Um eine angemessene Drahtspannung

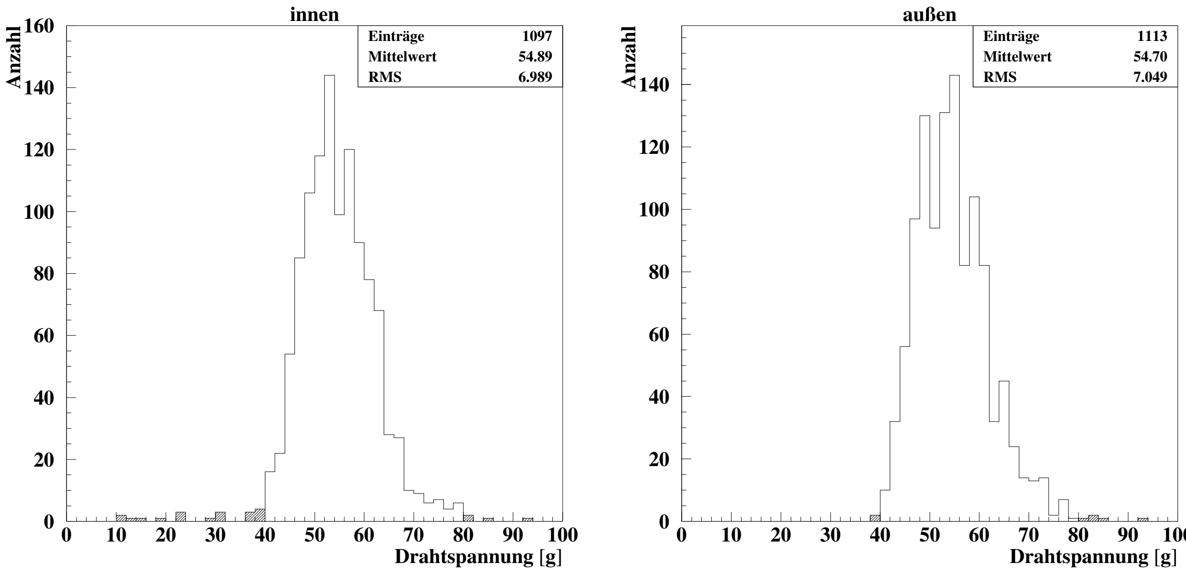

Abbildung B.3: Drahtspannungen der inneren und äußeren Sektoren.

zu gewährleisten, wurden Drähte mit einer Drahtspannung kleiner als 40 g oder größer als 80 g erneuert. Davon waren in den inneren Sektoren 23 (2.1%) und in den äußeren Sektoren 7 (0.6%) der jeweils 1120 gemessenen Drähte betroffen.

B.3 Hochspannungsstabilität

Da die Kammern während des Experimentes nicht mehr zugänglich sind, müssen sie vorher auf ihre Funktionsfähigkeit überprüft werden. Dies geschieht durch das Hochspannungstraining. Als Training wird hier der Effekt bezeichnet, daß bei an den Drähten konstant anliegender negativer Hochspannung der Strom durch die Kammer mit der Zeit abnimmt. Bei den Tests mit den neun Kammern für den Testlauf '96 hat es sich gezeigt, daß Kammern, die bei dem Hochspannungstraining in Luft mit geringer Luftfeuchtigkeit bei einer anliegenden Spannung von -1900 V einen Strom kleiner als 100 nA erreichen, bei ihrem Betrieb keine Probleme bezüglich ihres Hochspannungverhaltens zeigen. Während des Kammertrainings wurde festgestellt, daß die Kammern nicht immer das gewünschte Ziel erreichten. Blieb der Strom zu hoch, oder stieg sogar an, so war im allgemeinen ein einzelner Draht dafür verantwortlich. Konnte an diesem durch Training keine Verbesserung erzielt werden, wurde seine Verbindung zur Hochspannungsversorgung unterbrochen und das Training mit den restlichen Drähten fortgesetzt. Auf diese Weise wurden in den neun Kammern insgesamt elf der 2304 Drähte abgelöst, dies entspricht 0.5 %.

Der für das Hochspannungstraining verwendete Aufbau ist in Abbildung B.4 schematisch dargestellt. Dabei übernimmt der in Serie geschaltete 200 MΩ–Widerstand eine doppelte

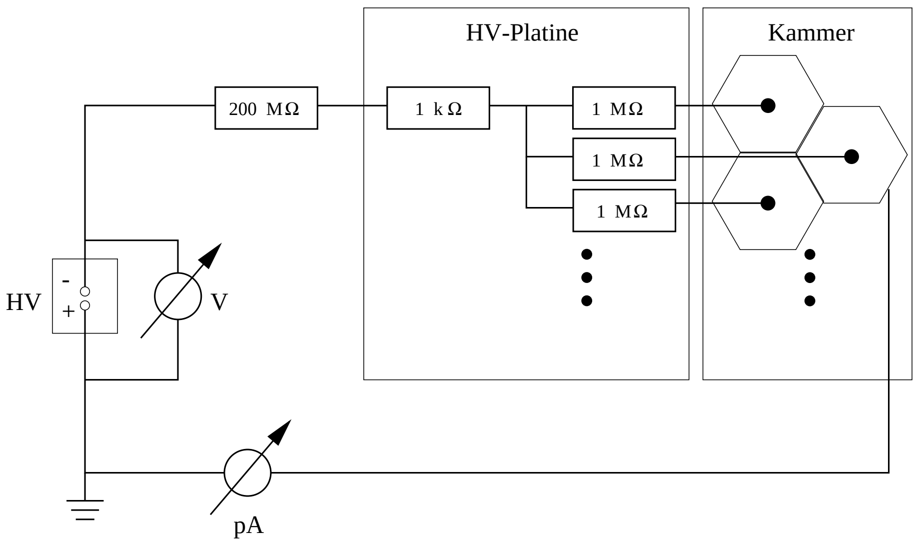

Abbildung B.4: Aufbau des Hochspannungstrainings.

Aufgabe: er schützt sowohl das Pikoamperemeter, als auch die Kammer vor überhöhten Strömen. Verursacht z.B. ein Draht bei anliegenden 1900 V einen Kurzschluß, so wird der Strom durch den Widerstand auf 9.5 μA begrenzt.

B.4 Qualitätskontrolle

Zum Abschluß der Produktion wurde jeder einzelne der 256 Kanäle einer Kammer auf seine Funktionsfähigkeit hin untersucht. Dies geschah unter den geplanten Betriebsbedingungen — in der Gasmischung CF_4/CH_4 (80/20) mit einer positiven Hochspannung von +2250 V auf den Drähten. Bei diesem schnellen Test wurden die Zellen mit einer ^{55}Fe–Quelle bestrahlt und das Analog–Signal mit der ARGUS–Vertexkammer–Elektronik ausgelesen. Auf dem Oszilloskop wurde nur überprüft, ob an dem jeweils bestrahlten Kanal Signale ausgelesen werden können oder nicht. Hier konnte gezeigt werden, daß an den elf beim Hochspannungstraining von der HV–Platine getrennten Drähten keine Signale zu sehen sind. Dies war aber auch an 30 weiteren Kanälen (1.3 %) der Fall. Die Ursache dafür kann in kalten Lötstellen oder defekten Hochspannungskondensatoren liegen. Insgesamt sind also 41 der 2304 Kanäle (1.8 %) unbrauchbar. Um diesen Anteil beim endgültigen Detektor zu reduzieren, sollten in jedem Fall die HV-Platinen mit den Koppelkondensatoren auf ihre Funktionsfähigkeit hin untersucht werden; dies wurde bei den Kammern Testlauf '96 versäumt.

Literaturverzeichnis

[Bak93] F. Bakker et al.
The construction and performance of single-layer honeycomb strip chambers in the TRACAL detector of RD5
Nucl. Instr. Meth. A330 (1993) 44.

[Bet30] H.A. Bethe
Zur Theorie des Durchgangs schneller Korpuskularstrahlen durch Materie
Ann. d. Phys., 5. Folge (1930) 325.

[Cra79] F.S. Crawford
Berkeley Physik Kurs Band 3, Schwingungen und Wellen
Fried. Vieweg & Sohn Verlagsgesellschaft mbH, Braunschweig (1979).

[Dec96] H. Deckers et al.
Beam Tests of Honeycomb Drift Chambers
HERA–B Note (in Arbeit).

[Des95] HERA–B Collaboration
HERA–B An Experiment to Study CP Violation in the B System Using an Internal Target at the HERA Proton Ring. Design Report
DESY–PRC 95/01 (1995).

[Gru93] C. Grupen
Teilchendetektoren
BI–Wissenschaftsverlag (1993).

[Kle87] K. Kleinknecht
Detektoren für Teilchenstrahlung
B. G. Teubner, Stuttgart (1987).

[Leo94] W.R. Leo
Techniques for Nuclear and Particle Physics Experiments
Springer–Verlag Berlin Heidelberg (1994).

[Loe61] L.B. Loeb
Basic processes of gaseous electronics
Univ. of California Press, Berkeley (1961).

[Mic89] E. Michel et al. (ARGUS Collaboration)
The ARGUS Microvertex Drift Chamber
Nucl. Instr. Meth. A283 (1989) 544.

[New93] F.M. Newcomer et al.
A Fast, Low Power, Amplifier-Shaper-Discriminator for High Rate Straw Tracking Systems
IEEE Trans. Nucl. Sci. NS–40 (4) (1993) 630.

[Pro94] HERA–B Collaboration
HERA–B An Experiment to Study CP Violation in the B System Using an Internal Target at the HERA Proton Ring. Proposal
DESY–PRC 94/02 (1994).

[Sau77] F. Sauli
Principles of Operation of Multiwire Proportional and Drift Chambers
CERN 77–09 (1977).

[Sch96] U. Schwanke
Aufbau und Durchführung von Testexperimenten mit Wabendriftkammern für das HERA–B–Experiment
Diplomarbeit, Humboldt–Universität zu Berlin (1996).

[Sou96] V. Souvorov
Persönliche Mitteilungen (1996).

Danksagung

An dieser Stelle möchte ich all jenen, die durch ihre Hilfsbereitschaft und Unterstützung zur Entstehung dieser Diplomarbeit beigetragen haben, meinen aufrichtigen und herzlichen Dank aussprechen. Ohne die gute Zusammenarbeit wäre meine Diplomarbeit nicht möglich gewesen. Mein besonderer Dank gilt vor allem:

> Herrn Prof. Dr. H. Kolanoski, der es mir ermöglicht hat, nach Zeuthen zu kommen. Durch seine intensive wissenschaftliche Betreuung habe ich viel gelernt.
>
> Dr. Michael Walter und all denjenigen Menschen am Institut, die mich hier so freundlich aufgenommen und unterstützt haben. Ich habe mich sehr wohl gefühlt.
>
> Dr. Klaus Berkhan für seine außerordentlich gute Betreuung. Er hat mir stets mit Rat und Tat zur Seite gestanden. Danke Klaus!
>
> Dr. Svesolod Souvorov, auf dessen magische Hände ich mich im Kampf gegen das Rauschen verlassen konnte. Nicht vergessen möchte ich die vielen netten Unterhaltungen in den Abendstunden und so manchen Kommentar zwischendurch: „Sometimes it's dangerous to measure something".
>
> Hartmut Deckers, Ullrich Schwanke und Dr. Christian Stegmann, mit deren Unterstützung ich in den vergangenen Monaten rechnen durfte. Letzterem insbesondere für seine aufmunternden Bemerkungen über die Diplomandenzeit: „Da wird man einfach ins kalte Wasser geschmissen". Er hätte wohl recht gehabt, wäre nicht Klaus gewesen.
>
> Wolfgang Haupt und Michael Jablonski für den Bau und Jürgen Pieper für das perfekte Löten der Drähte aller Testkammern. Ihnen gilt ein extra Dankeschön für die besondere Sorgfalt im Umgang mit der Kammer „Hubi".
>
> Dipl. Ing. Mario Pohl, der die ASD8B–Verstärkerkarte entwickelt hat und sich auch bei deren Inbetriebnahme als sehr hilfsbereit erwiesen hat, sowie Herrn Prof. Dr. G. Bohm, der immer ein offenes Ohr für meine Fragen hatte.

Ganz besonders möchte ich meiner Familie für ihren Rückhalt danken. All das, was meine Eltern für mich getan haben, kann durch ein einfaches Dankeschön nicht ausgedrückt werden. Euer Verständnis und Eure Unterstützung gingen weit über das Selbstverständliche hinaus. Euch möchte ich diese Diplomarbeit widmen.

Erklärung

Hiermit bestätige ich, daß ich die vorliegende Arbeit ohne unerlaubte fremde Hilfe angefertigt und keine anderen als die angegebenen Quellen und Hilfsmittel benutzt habe. Ich bin mit der Auslage meiner Diplomarbeit in der Bibliothek der Humboldt–Universität zu Berlin einverstanden.

Berlin, 30. November 1996