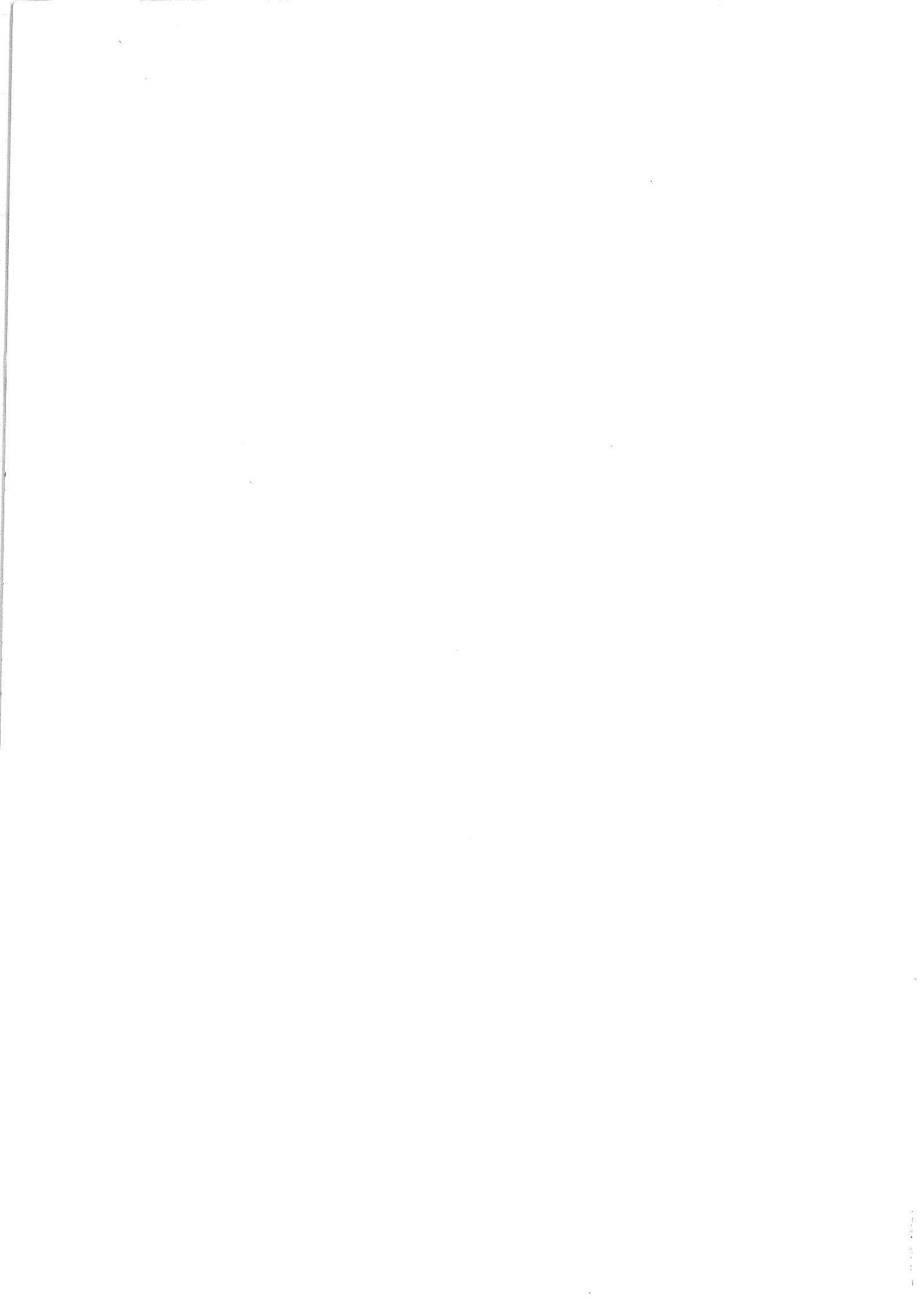


UNTERSUCHUNGEN ZUR WINKEL- UND
IMPULSABHÄNGIGKEIT
DER SIGNALE IN DEN MYONKAMMERN VON H1

Experimentelle Diplomarbeit von
MALTE HOLLMANN

II. Institut für Experimentalphysik
Universität Hamburg

Hamburg
März 1995



Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
2	Physik bei HERA	3
2.1	Photon-Gluon-Fusion	3
2.2	Produktion und Zerfall von J/ψ -Mesonen	4
2.3	Myonpaar-Erzeugung durch Photon-Photon-Kollisionen	5
3	Der Speicherring HERA und der H1-Detektor	6
3.1	Der Speicherring HERA	6
3.2	Der H1-Detektor	7
3.2.1	Das H1-Koordinatensystem	10
3.2.2	Die Spurkammern	10
3.2.3	Die Kalorimeter	11
3.2.4	Der Myondetektor	13
3.2.5	Die Magnetspule	13
4	Der zentrale Myondetektor des H1-Detektors	14
4.1	Aufbau	14
4.2	Funktionsweise	15
4.3	Anordnung	16
4.4	Instrumentierung	17
4.5	Gas- und Hochspannungsversorgung	19
4.6	Datennahme	19

5	Grundlagen der durchgeführten Untersuchungen	21
5.1	Definitionen	22
5.2	Verwendete Myonen	24
5.3	Abhängigkeiten	25
5.4	Monte-Carlo Simulation	28
5.5	Analyse	29
5.5.1	Winkelbestimmung im Zentralbereich und in den Endkappen . .	29
5.5.2	Korrekturen der Lagenachweiswahrscheinlichkeit	30
5.5.3	Funktionsweise des Analyseprogramms	33
6	Ergebnisse der Untersuchungen	35
6.1	Untersuchungsergebnisse für kosmische Myonen	35
6.1.1	Multiplizität für Draht- und Streifenlagen	36
6.1.2	Nachweiswahrscheinlichkeit für Draht- und Streifenlagen	41
6.2	Lagennachweiswahrscheinlichkeit für Strahl-Halo-Myonen	56
6.3	Vergleich der Untersuchungsergebnisse mit Myonen aus der Monte-Carlo Simulation	61
7	Zusammenfassung	77

Kapitel 1

Einleitung

Die Hadron-Elektronen-Ring-Anlage (HERA) in Hamburg am Deutschen Elektronen Synchrotron (DESY) wurde 1991 fertiggestellt und lieferte im späten Frühjahr 1992 die ersten Daten. HERA ist der erste Speicherring seiner Art, in dem 30 GeV Elektronen bzw. Positronen mit 820 GeV Protonen zur Kollision gebracht werden. Das führt zu einer Schwerpunktsenergie von $\sqrt{s} = 314 \text{ GeV}$.

Mit HERA kann ein vollständig neuer kinematischer Bereich erschlossen werden, da Viererimpulsquadrat-Werte von $Q^2 \approx 10^5 \text{ GeV}^2$ erreicht werden. Statistische und systematische Fehler beschränken den zugänglichen Bereich; deshalb ist eine hohe Luminosität und ein gutes Verständnis des Detektors notwendig.

Die Experimente bei HERA sollen das Standardmodell testen, nach neuen Teilchen, wie z.B. supersymmetrischen Teilchen, neuen Bosonen und schweren Leptonen, suchen, und die Struktur des Photons und des Protons soll untersucht werden. Folglich wurde der H1-Detektor so konzipiert, daß geladene und neutrale Teilchen identifiziert und exakt gemessen werden können.

Teilchen, die durch eine Kollision zwischen Elektronen bzw. Positronen und Protonen im H1-Detektor entstehen, können zum Teil durch den Zerfall in Myonen untersucht werden. Dazu ist es notwendig, die Myonen mit Hilfe des Myondetektors zu identifizieren. Einen wichtigen Anteil an der Erkennung von Myonen im H1-Detektor bildet das zentrale Myonsystem, mit dessen Eigenschaften sich diese Arbeit befaßt.

Hauptsächlich beschäftigt sich diese Arbeit mit der Untersuchung der Multiplizität und der Lagennachweiswahrscheinlichkeit im Myonsystem, d.h. der Wahrscheinlichkeit, ein minimalionisierendes Teilchen in einer bestimmten Lage nachzuweisen. Insbesondere die Lagennachweiswahrscheinlichkeit ist relevant für die Spurrekonstruktion und die Bestimmung der Triggerakzeptanzen. Nach dem Vergleich von Daten mit simulierten Ereignissen soll die Simulation den Daten angepaßt werden.

Von besonderem Interesse ist in dieser Diplomarbeit die Abhängigkeit der Lagennachweiswahrscheinlichkeit der Streamerrohrkammern (die im wesentlichen das H1-Myonnachweissystem konstituieren) vom Impuls und von den Einfallswinkeln in den

Modulen, in denen die Streamerrohrkammern positioniert sind. Dabei soll die Nachweiswahrscheinlichkeit auf nicht funktionierende Streamerrohrkammern und auf nicht instrumentierte Bereiche des Myonnachweissystems korrigiert werden.

In Kapitel 2 werden die physikalischen Prozesse erläutert, die zu der Erzeugung von Myonen führen können, welche dann in dem Myondetektor nachgewiesen werden.

Nach der Beschreibung des Aufbaus des Speicherringes HERA und des H1-Detektors in Kapitel 3 soll in Kapitel 4 der zentrale Myondetektor vorgestellt werden, der die Grundlage der Untersuchungen bildet, die im Rahmen dieser Diplomarbeit vorgenommen wurden.

Kapitel 5 gibt einen Überblick über die Grundlagen der durchgeführten Untersuchungen, und es wird detailliert die Funktionsweise des verwendeten Analyseprogramms beschrieben.

In Kapitel 6 werden die Untersuchungsergebnisse zur Winkel- und Impulsabhängigkeit der Lagennachweiswahrscheinlichkeit und Multiplizität vorgestellt und diskutiert. Den Ergebnissen der Untersuchungen mit realen Myonen sollen Untersuchungen mit Myonen aus der Monte-Carlo Simulation gegenübergestellt werden. Sowohl Multiplizitäten als auch Nachweiswahrscheinlichkeiten sollen verglichen werden. Abschließend — in Kapitel 7 — werden die Resultate zusammenfassend beurteilt.

Kapitel 2

Physik bei HERA

Mit Hilfe von Quarks und Leptonen und ihren Wechselwirkungen mit den zugehörigen Eichbosonen können die Phänomene der Hochenergiephysik beschrieben werden. Die starke Wechselwirkung zwischen Quarks und dem Gluon als Eichboson wird durch die $SU(3)_C$ Eichgruppe beschrieben. Für die elektroschwache Wechselwirkung benutzt man die $SU(2)_L \times U(1)_Y$ Eichtheorie. Faßt man diese beiden Eichtheorien zu $SU(3)_C \times SU(2)_L \times U(1)_Y$ zusammen, erhält man das Standardmodell der Elementarteilchenphysik [Per90].

Untersuchungen und Tests des Standardmodells sind von fundamentalem Interesse für die Physik. Die Erschließung neuer Energiebereiche hat in der Vergangenheit oft zu neuen Erkenntnissen geführt, da gerade Abweichungen der Vorhersagen des Standardmodells Hinweise auf neue Phänomene geben.

Da sich die vorliegende Arbeit mit dem Myonsystem beschäftigt, sollen in diesem Kapitel einige physikalische Reaktionen beschrieben werden, die mit dem Myondetektor des H1-Detektors bei HERA untersucht werden können.

2.1 Photon–Gluon–Fusion

Bei der *Photon–Gluon–Fusion* (deren Feynman–Graphen in der Abbildung 2.1 dargestellt sind) koppelt ein Gluon aus dem Proton über ein $q\bar{q}$ -Paar an ein vom Elektron emittiertes Photon. Der Wirkungsquerschnitt wird dominiert durch Prozesse mit quasi-einem Photon ($Q^2 \approx 0$); dabei spricht man von Photoproduktion.

Mit Hilfe der Photon–Gluon–Fusions–Ereignisse ist eine Bestimmung der Gluondichteverteilung im Proton möglich. Die Wirkungsquerschnitte werden für H1 wie folgt angegeben [Ali91]:

$$(ep \rightarrow b\bar{b}X) = (6,0 \pm 1,1)nb \quad (2.1)$$

$$(ep \rightarrow c\bar{c}X) = (680_{-180}^{+260})nb. \quad (2.2)$$

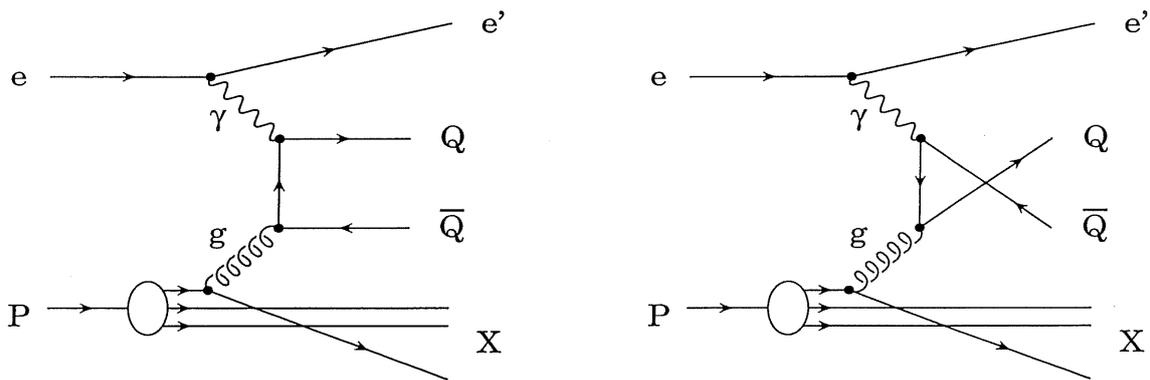


Abbildung 2.1: Feynman-Graphen für die Photon-Gluon-Fusion

Bei der Photon-Gluon-Fusion können $b\bar{b}$ - und $c\bar{c}$ -Quark-Antiquarkpaare erzeugt werden. Schwere Quarks können über die schwache Wechselwirkung unter Emission eines Myons und eines Neutrinos in ein leichtes Quark zerfallen. Die Zerfallswahrscheinlichkeit eines b -Quarks in ein Myon und ein Neutrino beträgt 10,3%; für ein c -Quark in ein Myon und ein Neutrino 10,5% [PDG92]. Es haben etwa 21% ($\pm 1\%$) aller $b\bar{b}$ - und 18% ($\pm 2\%$) aller $c\bar{c}$ -Ereignisse [Kru94] mindestens ein Myon im Endzustand, wodurch diese Ereignisse im H1-Detektor nachgewiesen werden können. $c\bar{c}$ -Ereignisse können darüberhinaus mit Hilfe des D^* -Mesons nachgewiesen werden.

2.2 Produktion und Zerfall von J/ψ -Mesonen

Die Erzeugung von J/ψ -Mesonen kann inelastisch durch Photon-Gluon-Fusion oder durch diffraktive elastische oder diffraktive inelastische Prozesse beschrieben werden (die zugehörigen Feynman-Graphen sind in Abbildung 2.2 dargestellt).

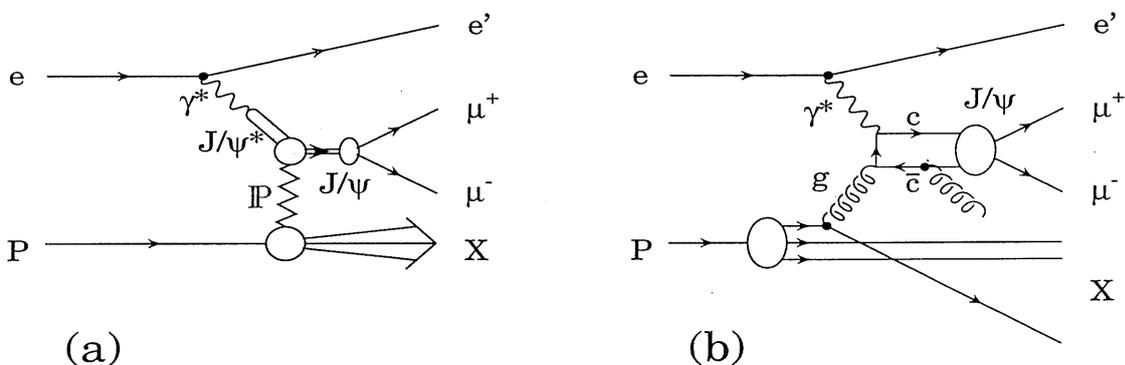


Abbildung 2.2: Feynman-Graphen für die J/ψ -Produktion

Die Photon-Gluon-Fusion ist bei Prozessen anwendbar, in denen das Proton in einzelne Partonen aufbricht. Da das Proton inelastisch gestreut wird, spricht man auch

von *inelastischer J/ψ -Produktion*. Der Wirkungsquerschnitt von quasielastischer J/ψ -Produktion wird in [H1J94] mit

$$\sigma(ep \rightarrow J/\psi X) = (8,8 \pm 2,0 \pm 2,2) nb \quad (2.3)$$

angegeben.

Erfolgt die Streuung am ganzen Proton, kann die Struktur des Protons nicht aufgelöst werden. Dieser Prozeß ist störungstheoretisch nicht berechenbar. Man beschreibt diesen Prozeß phänomenologisch als diffraktiven Prozeß. Die Wechselwirkung des Photons mit dem J/ψ -Meson wird mit Hilfe des Vektordominanz-Modells beschrieben. Die Wechselwirkung des Protons mit dem J/ψ -Meson erfolgt durch das Pomeron als Austauscheteilchen. Der gesamte diffraktive Wirkungsquerschnitt wird in [Smi93] mit $10 nb$ abgeschätzt.

Da das J/ψ -Meson mit einem Verzweigungsverhältnis von 5,97% [PDG92] in zwei Myonen ($\mu^+\mu^-$) zerfällt, kann das J/ψ -Meson über die beiden Zerfallsmyonen im H1-Detektor nachgewiesen werden. Die Masse des J/ψ -Meson beträgt $M_{J/\psi} = 3,097 GeV$ [PDG92]. Andere Zerfallskanäle des Mesons sind der Zerfall in zwei Elektronen (6,27%) oder in Hadronen.

2.3 Myonpaar-Erzeugung durch Photon-Photon-Kollisionen

Ein weiterer Prozeß mit zwei Myonen im Ausgangskanal ist die Reaktion $\gamma\gamma \rightarrow \mu^+\mu^-$. Dabei koppelt, wie man an den Feynmangraphen in der Abbildung 2.3 sehen kann, sowohl an das Elektron als auch an das Proton ein quasireelles Photon. Der totale Wirkungsquerschnitt wird von [Due94] mit $103 nb$ angegeben.

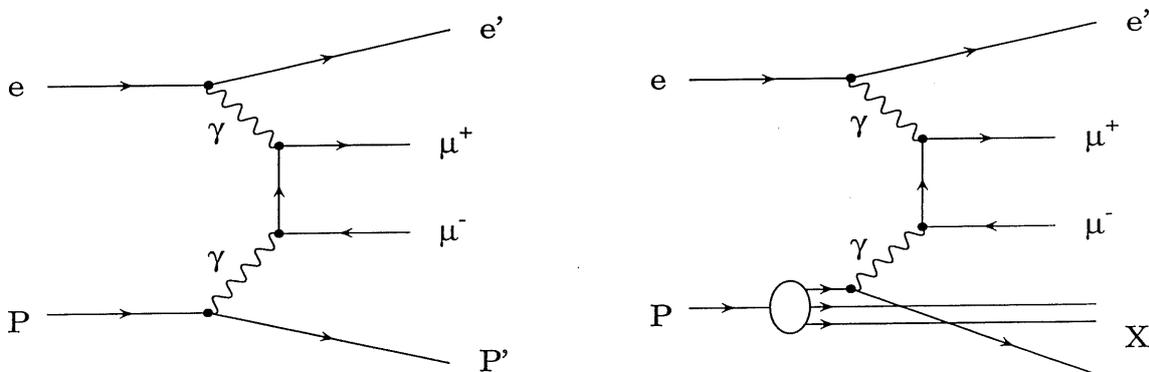


Abbildung 2.3: Feynman-Graphen für die Produktion von Myonpaaren durch die Photon-Photon-Kollision

Kapitel 3

Der Speicherring HERA und der H₁-Detektor

3.1 Der Speicherring HERA

Das Deutsche Elektronen Synchrotron ist ein Forschungszentrum für Teilchenphysik und Synchrotronstrahlung. DESY bietet die Möglichkeit, an Hochenergie-Beschleunigern grundlegende Fragen nach dem Aufbau der Materie experimentell zu erforschen. Für diesen Zweck wird von DESY die Proton-Elektron-Speicherring-Anlage HERA mit den Experimenten H1, ZEUS, HERMES und HERA-B betrieben.

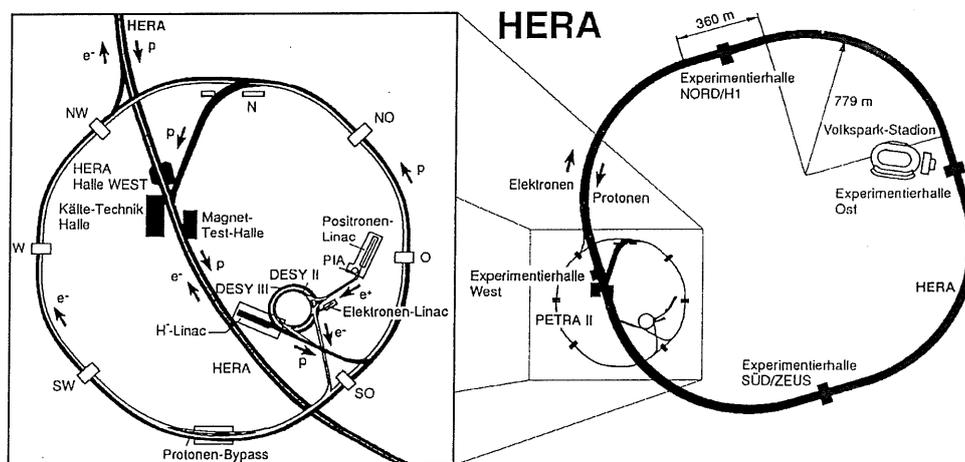


Abbildung 3.1: Der Speicherring HERA und die Vorbeschleuniger

Eine Kette von sechs Vorbeschleunigern versorgt die Speicherringe DORIS und HERA mit Elektronen, Positronen und Protonen der erforderlichen Anfangsenergie. Zur Vorbeschleunigung werden drei Linearbeschleuniger (jeweils ein Linearbeschleuniger

für Elektronen, Positronen und Protonen), ein Akkumulations-Speicherring und drei Kreisbeschleuniger verwendet (vgl. Abbildung 3.1).

Die Hadron-Elektron-Speicherring-Anlage HERA, die in einer Tiefe von $10 - 25\text{ m}$ unter der Erdoberfläche verläuft, hat einen Umfang von 6336 m . Es werden Positronen einer Energie von ca. 30 GeV mit Protonen einer Energie von ca. 820 GeV zur Kollision gebracht (die Energie der Elektronen (bzw. Positronen) wird durch Strahlungsverluste, die Energie der Protonen wird durch eine mit vertretbarem Aufwand erreichbare Magnetfeldstärke der Ablenkmagnete limitiert). Positronen und Protonen können in vier Wechselwirkungszonen alle 96 ns zur Kollision gebracht werden: in Halle Nord im H1-Detektor und in Halle Süd im ZEUS-Detektor.

Da die Elektronen (bzw. Positronen) und die Protonen bei HERA unterschiedliche Impulse haben, werden getrennte Magnetsysteme verwendet. Die Magnete des Elektronenrings wurden mit konventioneller Technik gebaut und erzeugen ein Magnetfeld von maximal $0,16\text{ T}$. Um die Protonen auf einer Kreisbahn zu halten, werden wesentlich größere Magnetfeldstärken benötigt. Dort werden supraleitende Magnete verwendet, die ein Magnetfeld einer Größe von $4,68\text{ T}$ erzeugen. Weitere wichtige Daten über HERA sind in der Tabelle 3.1¹ [Sch90] zusammengefaßt.

3.2 Der H1-Detektor

Wegen der unterschiedlichen Strahlenergien ist der H1-Detektor asymmetrisch aufgebaut. Aus diesem Grund ist auch das Spurkammersystem in zwei Bereiche unterteilt: in den vorderen ($5^\circ < \theta < 25^\circ$)² und in den zentralen ($25^\circ < \theta < 160^\circ$). Ein hadronisches Kalorimeter [5]³ wird in Vorwärts-(Proton-)Richtung benötigt, wogegen die gestreuten Teilchen mit dem *Warmen Elektromagnetischen Kalorimeter* (BEMC genannt) [12] in Rückwärtsrichtung nachgewiesen werden [FH1K94].

Prinzipiell besteht der H1-Detektor, der in der Abbildung 3.2 illustriert wird, aus folgenden Komponenten:

- den *Spurkammern* [2]: diese dienen zum Nachweis von Spuren geladener Teilchen,
- den *Kalorimetern* [4] und [5]: diese dienen zum Nachweis von Teilchen, die bei einer Reaktion entstehen,
- den *Myonkammern* [9]: diese identifizieren Myonen und messen die Energie, die nicht im Kalorimeter deponiert wurde und
- der *Magnetspule* [6]: diese erzeugt ein nahezu homogenes Magnetfeld im Zentralbereich des Detektors, welches zur Impulsbestimmung von geladenen Teilchen in den Spurkammern benötigt wird.

¹Die Größen in Klammern beziehen sich auf Werte, die während der Datennahmeperiode 1994 erreicht wurden [Fel95].

²Siehe auch Kapitel 3.2.1.

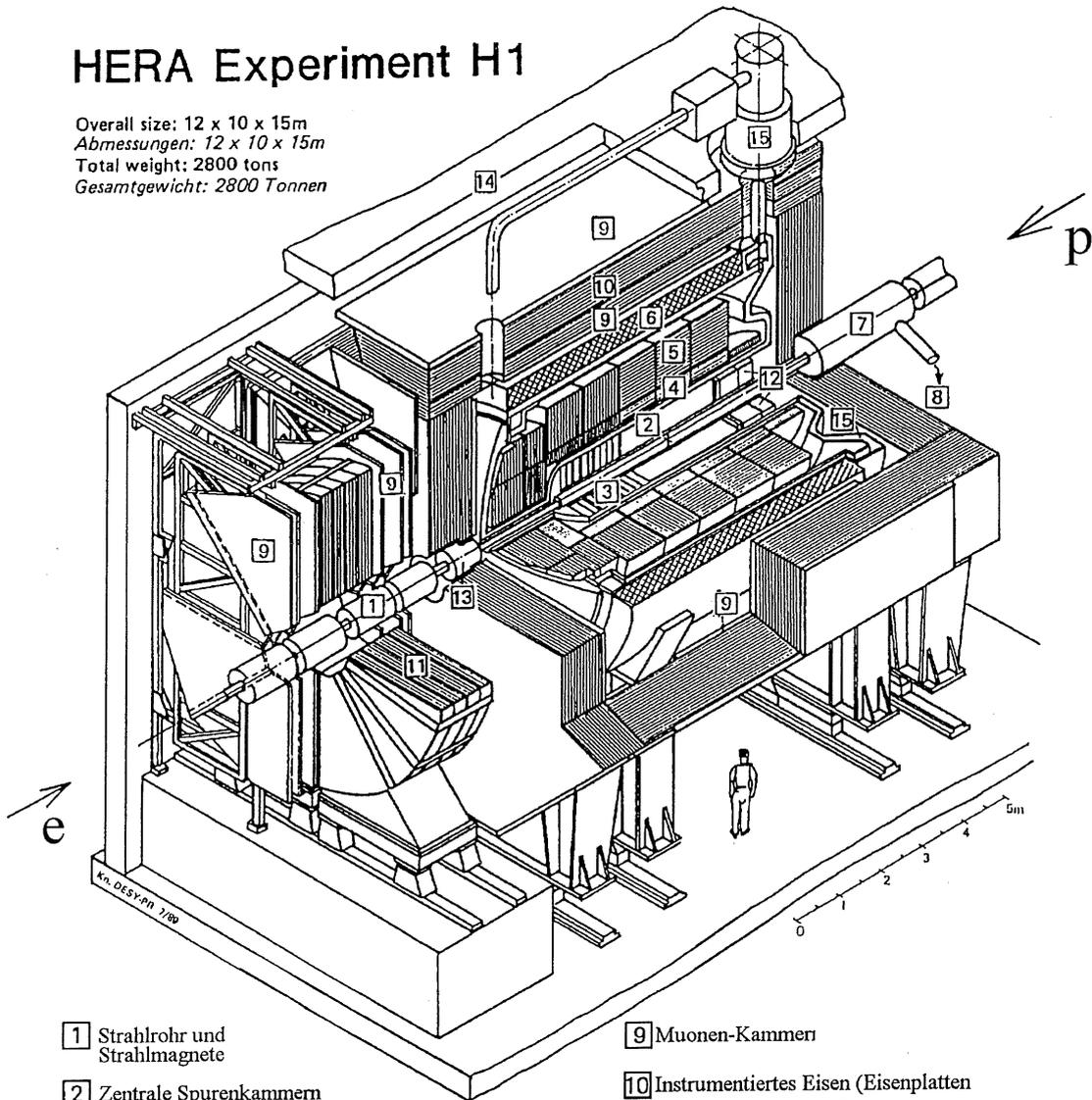
³Die folgenden Nummern [n] auf den Seiten 8 – 14 beziehen sich auf die Abbildung 3.2.

Allgemeines			
Bauzeit	Mai 1984 – November 1990		
Kosten der Anlage	1,010 Mrd. DM		
Zahl der beteiligten Staaten	12		
Inbetriebnahme	Oktober 1991		
HERA-Tunnel			
Umfang	6336 m		
Tiefe	10 – 25 m		
Dicke der Tunnelwände	30 cm		
Innendurchmesser	5,2 m		
Zahl der Vorbeschleuniger	7		
HERA-Experimentierhallen			
Anzahl	4		
Größe	25 × 43 × ca. 25 m ³		
Experimente	H1 & ZEUS & HERMES & HERA-B		
Inbetriebnahme	April 1991		
Strahleigenschaften		Elektronenring	Protonenring
Maximale Strahlenergie	30 GeV (27,5 GeV)	820 GeV (820 GeV)	
Schwerpunktsenergie	314 GeV (300 GeV)		
Injektionsenergie	14 GeV (12 GeV)	40 GeV (40 GeV)	
Spezifische Luminosität	$3,6 \cdot 10^{29} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1} \text{ mA}^{-2}$		
Integrierte Luminosität	$10^5 \text{ nb}^{-1} \text{ a}^{-1}$ ($6 \cdot 10^3 \text{ nb}^{-1} \text{ a}^{-1}$)		
Maximaler Teilchenstrom	60 mA (30 mA)	160 mA (50 mA)	
Teilchen pro Paket	$3,5 \cdot 10^{10}$	10^{11}	
Zahl der Pakete im Ring	210 (153 + 15)	210 (153 + 17)	
Paketlänge	30 mm	440 mm	
Paketabstand	28,8 m bzw. 96 ns		
Mittlere Lebensdauer	10 h (≈ 10 h)	50 h (> 100 h)	
Strahlbreite in den WW-Punkten	0,264 mm	0,300 mm	
Strahlhöhe in den WW-Punkten	0,017 mm	0,095 mm	
Strahllänge in den WW-Punkten	8,0 mm	11,0 mm	
Strahlungsverlust pro Umlauf	125 MeV	6 eV	
Polarisierungszeit bei 30 GeV	27 min	–	
Ringfüllzeit	15 min	20 min	
Speicherringe		Elektronen	Protonen
Gesamtzahl der Magnete	2009	1833	
Haupt-Dipolmagnete	465	422	
Haupt-Quadrupolmagnete	605	224	
Feldstärke der Haupt-Dipolmagnete	0,16 T (0,155 T)	4,68 T (4,68 T)	
Zahl der konventionellen HF-Resonatoren	82	2	
Zahl der supraleitenden HF-Resonatoren	16	–	
Frequenz der HF-Resonatoren	500 MHz	52 MHz	

Tabelle 3.1: Die wichtigsten Kenndaten der Hadron-Elektron-Ring-Anlage (HERA)

HERA Experiment H1

Overall size: 12 x 10 x 15m
 Abmessungen: 12 x 10 x 15m
 Total weight: 2800 tons
 Gesamtgewicht: 2800 Tonnen



- | | |
|---|--|
| 1 Strahlrohr und Strahlmagnete | 9 Muonen-Kammer |
| 2 Zentrale Spurenkammern | 10 Instrumentiertes Eisen (Eisenplatten und Streamerröhren-Detekoren) |
| 3 Vorwärtsspurkammer und Übergangsstrahlungsmodul | 11 Muon-Toroidmagnet |
| 4 Elektromagnetisches Kalorimeter (Blei) | } Flüssig Argon |
| 5 Hadronisches Kalorimeter (Edelstahl) | |
| 6 Supraleitende Spule | 12 rückwärtige Spurenkammer und warmes elektromagnetisches Kalorimeter |
| 7 Kompensationsmagnet | 13 Vorwärts-Kalorimeter |
| 8 Helium Kälteanlage | 14 Betonabschirmung |
| | 15 Flüssig Argon Kryostat |

Abbildung 3.2: Der H1-Detektor

3.2.1 Das H1-Koordinatensystem

Bei dem H1-Koordinatensystem (vgl. Abbildung 3.3) handelt es sich um ein kartesisches Koordinatensystem, dessen Ursprung der nominelle $e-p$ -Wechselwirkungspunkt (auch *Vertexregion* genannt) ist. Die z -Achse ist durch die Richtung der Protonen definiert. Die x -Achse liegt in der horizontalen Ebene, und die y -Achse verläuft vertikal.

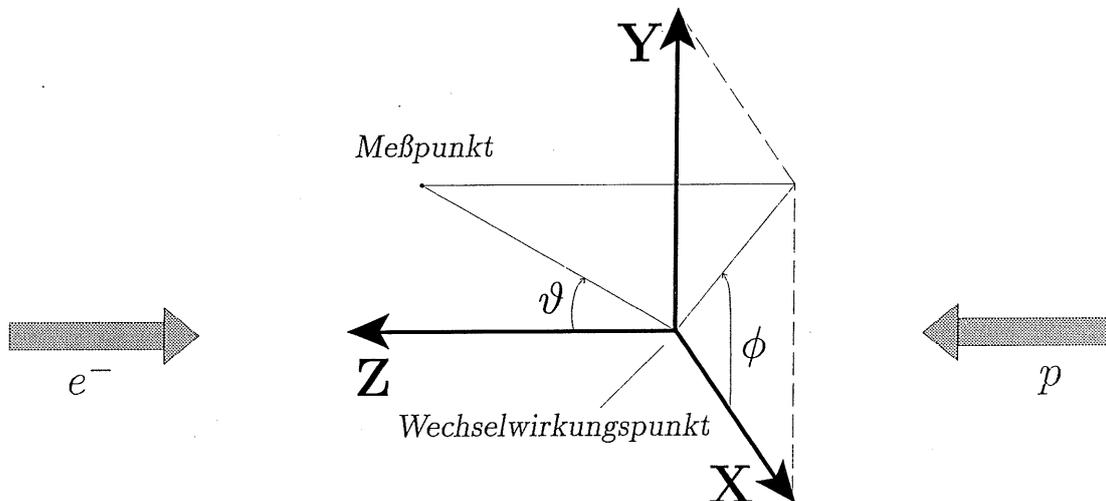


Abbildung 3.3: Das H1-Koordinatensystem

3.2.2 Die Spurkammern

Die Spurkammern ([2] und [3] , detailliert dargestellt in der Abbildung 3.4) dienen zum Nachweis geladener Teilchen. Sie sind das erste Detektorelement, welches sich an das Strahlrohr [1] anschließt. Da sich die Spurkammern vollständig in dem $1.2 T$ starken Magnetfeld der Solenoidspule [6] befinden, läßt sich aus der Krümmung der Teilchenflugbahn, die in den Spurkammern nachgewiesen wird, der Impuls berechnen. Die Spurkammern sind in den zentralen [2] und den vorderen Bereich [3] unterteilt.

Die zentrale Spurkammer (*central tracker*) besteht aus sechs zylindrischen Kammern mit unabhängigen Gasvolumina und getrennten elektrostatischen Abschirmungen. Beginnend vom Wechselwirkungspunkt wird ein Teilchen durch die innere Vieldrahtproportionalkammer (MWPC⁴) — genannt CIP⁵ — nachgewiesen, dann durch die innere z -Driftkammer (CIZ⁶), danach durch die innere Jetkammer (CJC1⁷), die äußere z -Driftkammer (COZ⁸), die äußere Vieldrahtproportionalkammer (COP⁹) und die äußere

⁴Multi Wire Proportional Chamber

⁵Central Inner Proportional Chamber

⁶Central Inner z -Chamber

⁷Central Jet Chamber 1

⁸Central Outer z -Chamber

⁹Central Outer Proportional Chamber

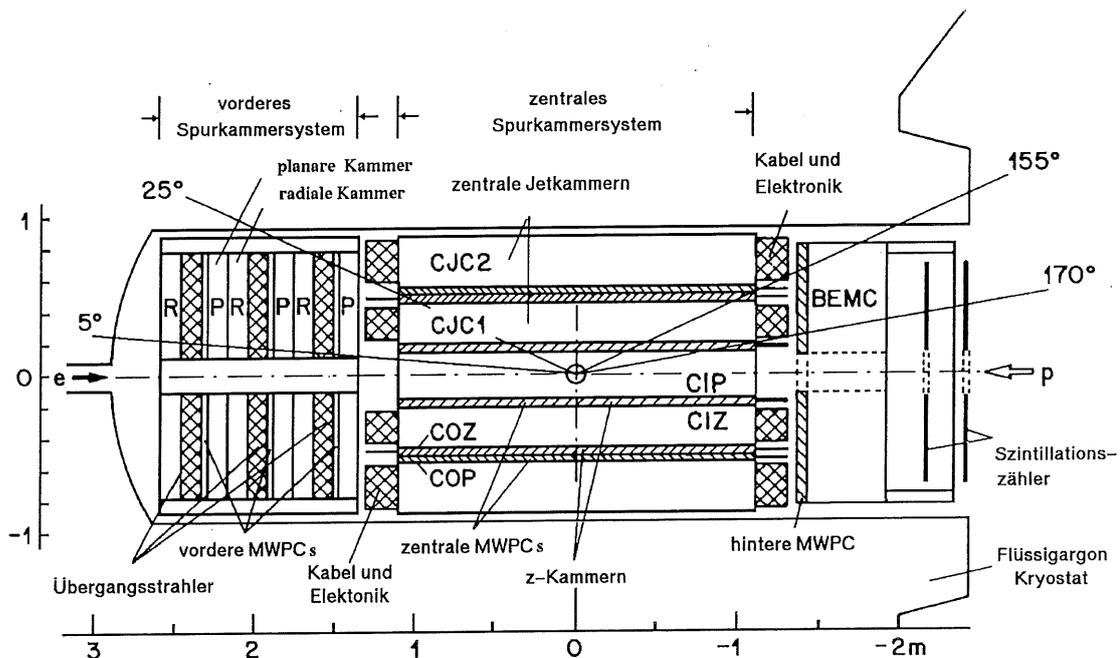


Abbildung 3.4: Das Spurkammersystem

Jetkammer (CJC2¹⁰). Mit den beiden Jetkammern (CJC1 und CJC2) können Teilchenspuren in der R/ϕ -Ebene präzise vermessen werden. Mit den z -Driftkammern läßt sich die z -Koordinate der Teilchenspuren bestimmen.

Das Spurkammersystem im Vorwärtsbereich besteht aus einer Kombination von planaren und radialen Driftkammern, mit deren Hilfe der Polarwinkel θ bestimmt werden kann bzw. die Spuren in der R/ϕ -Ebene vermessen werden können.

Das Spurerkennungssystem wird in Rückwärtsrichtung vervollständigt durch eine Vieldrahtproportionalkammer, die vor dem rückwärtigen elektromagnetischen Kalorimeter [12] positioniert wurde.

3.2.3 Die Kalorimeter

Das Flüssig-Argon-Kalorimeter

Mit dem Flüssig-Argon-Kalorimeter ([4] und [5]) wird der Energiefluß von Elektronen (bzw. Positronen), Hadronen und Photonen gemessen. Das Kalorimeter ist ein *Samplingkalorimeter*, das aus alternierenden Schichten Absorbermaterial und Ausleselementen besteht.

Die Ausleselemente sind Flüssig-Argon-Ionisationskammern. Das Absorbermaterial des inneren Kalorimeters, das zur Vermessung des elektromagnetischen Energieanteils

¹⁰Central Jet Chamber 2

dient, besteht aus Blei, das im Abstand von $2,35\text{ mm}$ in $2,4\text{ mm}$ dicken Platten angeordnet ist. Das Absorbermaterial des äußeren Kalorimeters, das zur Vermessung des hadronischen Energieanteils dient, besteht aus 19 mm dicken Edelstahlplatten in einem Abstand von $4,6\text{ mm}$.

Das Kalorimeter besteht aus acht Ringen, die das Strahlrohr bzw. die Spurkammern umschließen. Alle Module befinden sich vollständig in einem Kryostaten, der das flüssige Argon enthält.

Die angestrebte Energieauflösung des Flüssig-Argon-Kalorimeters beträgt [H1C93]:

- für das elektromagnetische Kalorimeter:

$$\frac{\sigma_E}{E} = \frac{0,11}{\sqrt{E}} \oplus 0,01 \quad (3.1)$$

- für das hadronische Kalorimeter:

$$\frac{\sigma_E}{E} = \frac{0,5}{\sqrt{E}} \oplus 0,02. \quad (3.2)$$

Die Kalorimeter im Rückwärts- und Vorwärtsbereich

In der Rückwärtsrichtung ($150^\circ \leq \theta \leq 178^\circ$) mißt ein weiteres Kalorimeter — das BEMC — die Energie von tief inelastisch gestreuten Elektronen unter kleinen Winkeln. Auch dieses Kalorimeter ist ein Sampling-Kalorimeter mit einer Schichtung aus abwechselnd $2,5\text{ mm}$ Blei und 4 mm Szintillatormaterial. Die gesamte Tiefe des Kalorimeters beträgt 22 Strahlungslängen X_0 .

Die Energieauflösung des BEMC für Elektronen bei senkrechtem zentralem Einschluß in die Module wurde in Testmessungen zu [Kas94]

$$\frac{\sigma_E}{E} = \frac{0,09}{\sqrt{E}} \oplus 0,01 \quad (3.3)$$

ermittelt.

In der Vorwärtsrichtung ($0,72^\circ \leq \theta \leq 3,44^\circ$) befindet sich das *Plug-Kalorimeter* [13]. Dieses Kalorimeter weist die Energie der Teilchen nach, die im Flüssig-Argon-Kalorimeter nicht registriert worden sind. Bei diesem Sampling-Kalorimeter wechseln sich Absorberschichten aus Kupfer mit Ausleseelementen aus Halbleiterdetektoren ab.

Die Energieauflösung des Plug-Kalorimeters beträgt nach [H194] $\frac{\sigma_E}{E} = \frac{1,50}{\sqrt{E}} \sqrt{\text{GeV}}$ bei einer Ortsauflösung von $\sigma_\theta \leq 5\text{ mrad}$ [Tut91].

3.2.4 Der Myondetektor

Der zentrale Myondetektor

Um die Magnetspule herum befindet sich ein Eisenjoch zur Rückführung des Magnetfeldes. Das Eisenjoch ist mit Schlitzten versehen, in denen sich Lagen aus *Streamerrohrkammern* befinden.

Diese Kammern haben zum einen die Aufgabe, Restenergie nachzuweisen, die nicht vollständig im Flüssig-Argon-Kalorimeter absorbiert wurde, zum anderen dienen sie zum Nachweis von Myonen.

Da der zentrale Myondetektor [10] (auch als *instrumentiertes Eisen* bezeichnet) in dieser Arbeit untersucht wurde, wird er im folgenden Kapitel detaillierter beschrieben.

Das Myonspektrometer im Vorwärtsbereich

Der Winkelbereich $3^\circ \leq \theta \leq 17^\circ$ dient zum Nachweis von hochenergetischen Myonen in Vorwärtsrichtung durch ein spezielles Myonspektrometer [9]. Dieses Spektrometer besteht aus einem Toroidmagneten [11] mit einer integrierten Feldlänge von $\int Bdl = 1,8 Tm$ und Driftkammern. Je drei Driftkammern (radial und azimuthal) befinden sich vor und hinter dem Toroidmagneten. Mit diesem Myonspektrometer läßt sich der Impuls von Myonen mit folgender Genauigkeit bestimmen [H194]:

$$\frac{\sigma_p}{p} = 0,24 \text{ für } p_\mu = 5 \frac{GeV}{c} \text{ und} \quad (3.4)$$

$$\frac{\sigma_p}{p} = 0,36 \text{ für } p_\mu = 200 \frac{GeV}{c}. \quad (3.5)$$

3.2.5 Die Magnetspule

Das magnetische Feld mit einer Feldstärke von $1.2 T$ wird durch eine supraleitende Spule [6] mit einem Radius von $2,75 m$ innerhalb eines Stahlkryostaten erzeugt. Das Magnetfeld, das durch diese Spule erzeugt wird, verläuft parallel zum Strahlrohr und ist im Zentralbereich homogen. Wegen dieses Magnetfeldes verlaufen Bahnen geladener Teilchen gekrümmt. Aus der Spurkrümmung geladener Teilchen im Magnetfeld läßt sich der Impuls berechnen.

Da die supraleitende Spule räumlich so groß gewählt wurde, befindet sich auch das Flüssig-Argon-Kalorimeter noch innerhalb des Magnetfeldes. Teilchen, die im Kalorimeter nachgewiesen werden, haben — da sie das magnetfelderzeugende System nicht durchdringen müssen — entsprechend weniger inaktives Detektormaterial passieren müssen. Dadurch kann eine genauere Energieauflösung erreicht werden.

Kapitel 4

Der zentrale Myondetektor des H₁-Detektors

Der äußerste Bereich des Hauptteils des H₁-Detektors ist das instrumentierte Eisenjoch. Die zehn 7,5 cm dicken Eisenplatten dienen primär der Rückführung des magnetischen Flusses der Spule. In den Schlitzen zwischen den Eisenplatten und innen und außen sind Lagen von Streamerrohrkammern [Ata82] angebracht, die zur Energiemessung und zur Spurbestimmung minimalionisierender Teilchen (vor allem Myonen) dienen. Aus Sicherheitsgründen werden die Streamerrohrkammern aus halogenfreiem Material (Luranyl) gefertigt, und es wird eine nicht-brennbare Gasmischung (88 % CO₂, 9,5 % Isobutan und 2,5 % Ar) verwendet.

Drähte und streifenförmige Elektroden des zentralen Myondetektors dienen zur Spurbestimmung. Großflächige Elektroden (*Pads*) sammeln die Influenzladung, die für die Energiemessung verwendet wird.

4.1 Aufbau

Die kleinste Einheit des H₁-Streamerrohr-Systems ist ein 1 – 6 m langes Streamerrohr mit einem quadratischen Innenquerschnitt von $9 \times 9 \text{ mm}^2$, in dessen Mitte ein $100 \mu\text{m}$ dicker versilberter Kupfer-Beryllium-Draht gespannt ist. Acht dieser Rohre (auch *Streamerrohrzellen* genannt) nebeneinander, jeweils getrennt durch einen 1 mm dicken Steg, bilden ein *Profil*. Die Innenseite eines solchen Profils ist bei Normaldruck auf einem Potential von -4500 V gehalten und besitzt wegen einer Graphitschicht einen Oberflächenwiderstand von ca. $10 \frac{\text{K}\Omega}{\square}$. Die Abdeckung der Profile aus dem halogenfreien Kunststoff Luranyl ist ebenfalls graphitbeschichtet und hat einen Oberflächenwiderstand von $10 \frac{\text{M}\Omega}{\square}$. Zwei solcher Profile werden zu einem *Element* in einer gasdichten Luranyl-Box zusammengefaßt (vgl. Abbildung 4.1).

Mehrere zusammengefaßte Elemente füllen die Schlitze des Eisenjochs und werden als *Drahtlagen* bezeichnet (die detaillierte Instrumentierung des zentralen Myonsystems

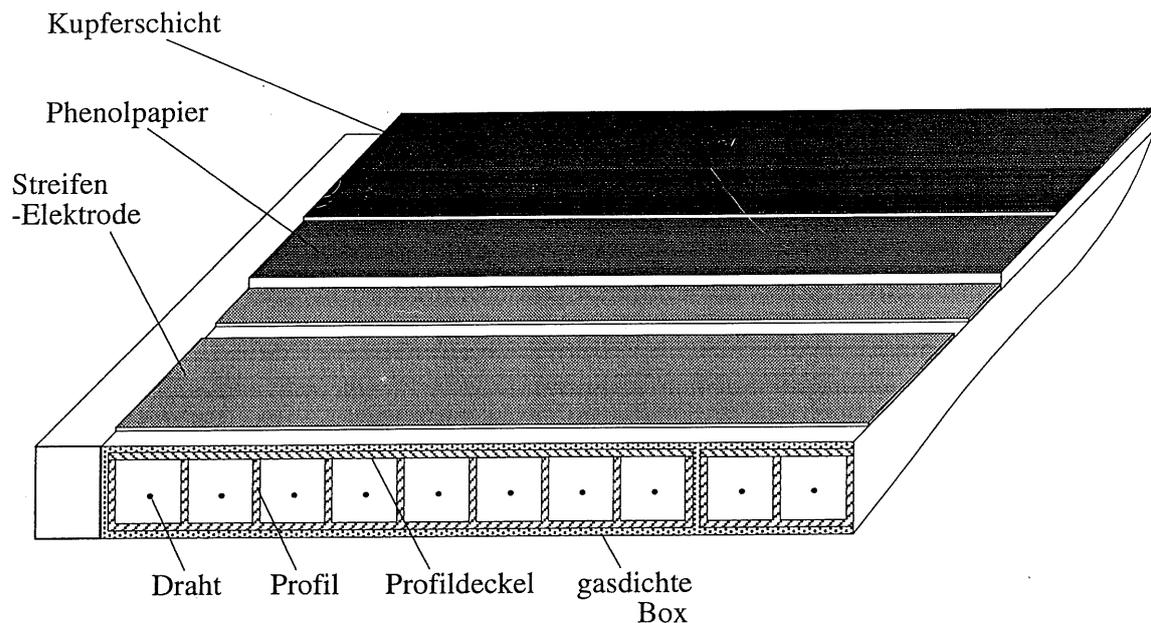


Abbildung 4.1: Schematischer Aufbau einer Streamerrohrkammer

wird in Kapitel 4.4 beschrieben). Auf den Drahtlagen sind zusätzlich Influenzelektroden aufgeklebt: senkrecht zur Drahtrichtung 17 mm breite Kupferstreifen (*Streifen-elektroden*) und $50 \times 50\text{ cm}^2$ (bzw. $30 \times 30\text{ cm}^2$ in den Endkappen) große rechteckige Elektroden. Die einzelnen 17 mm breiten Streifen-elektroden sind in einem Abstand von 3 mm angebracht. Die Streifen werden zur Rekonstruktion der Myonspuren im Eisen verwendet und über die influenzierte Ladung, die bei den großflächigen Elektroden gemessen wird, wird auf die im Eisen deponierte hadronische Energie geschlossen.

4.2 Funktionsweise

Passiert ein geladenes Teilchen das aktive Gasvolumen einer Streamerrohrkammer, so ionisiert es die Gasmoleküle in dieser Kammer. Im inhomogenen elektrischen Feld, das zwischen dem Draht und der Wand einer Streamerrohrkammer anliegt, werden die Elektronen, die bei der Gasionisation entstanden sind, so stark beschleunigt, daß weitere Gasmoleküle durch Stöße ionisiert werden. Die bei der Ionisation freiwerdenden Elektronen bewegen sich lawinenartig zum Anodendraht. Im *Proportionalmodus* ist die erzeugte Ladungsmenge proportional zur Primärionisation; dabei werden Gasverstärkungen bis zu 10^7 erzielt.

Erst in unmittelbarer Drahtnähe ($\approx 100\text{ }\mu\text{m}$ vor der Drahtoberfläche) setzt die Gasverstärkung ein. Die entstehende Elektronenlawine erreicht nach ca. 10^{-9} s den Draht, während die Ionen sich sehr viel langsamer der Kathode nähern. Bei hohen Gasverstärkungsfaktoren kann die — durch die Ionen verursachte — Raumladung nicht

vernachlässigt werden. Die Raumladung führt zu einer Abschwächung des elektrischen Feldes im Bereich der Elektronenlawine und zu einer Verstärkung des Feldes zwischen der Raumladungszone und der Kathode. Dadurch kann bereits in einem größeren Abstand vom Draht eine Gasverstärkung einsetzen.

Für die Ausbildung einer *Streamerzelle* ist eine ausreichende Raumladungsdichte der Ladungslawine erforderlich. Diese Raumladungsdichte hängt von den Betriebsbedingungen der Streamerrohre und von der Dichte der primären Ionisation ab [Ata82].

Um eine Selbstionisation des Gases im Rohr zu verhindern, ist dem Gas in der Kammer ein *Löschgas* beigemischt, welches Photonen absorbieren soll, ohne selbst ionisiert zu werden. Bei H1 wird als Löschgas Isobutan (2-Methylpropan $CH(CH_3)_2$ [CRC88]) verwendet. Erreicht die Streamerzelle den Draht, wird die erzeugte Ladung über den Spannungsabfall an einem Widerstand gemessen und ergibt (bei bekannten Drahtkoordinaten) eine zweidimensionale Ortsinformation (diese ist nur zweidimensional, da aus dem Signal nicht hervorgeht, an welcher Stelle des Drahtes die Streamerzelle ausgelöst wurde).

Durch die Graphitbeschichtung der Kammerwände wird auf den aufgebrachten Streifen Elektroden und den großflächigen Elektroden ein Signal influenziert. Das Signal der Streifen Elektroden liefert eine weitere zweidimensionale Ortsinformation (in der Ebene senkrecht zur Drahtlage und parallel zum Draht). Das Signal der großflächigen Elektroden dient zur Bestimmung der im Eisenjoch deponierten hadronischen Energie.

4.3 Anordnung

Im zentralen Bereich des Detektors umschließt das Eisenjoch das Strahlrohr. Das Eisenjoch hat im Zentralbereich einen oktagonalen Querschnitt und wird dort auch *Barrel* genannt. Der Zentralbereich ist unterteilt in den Vorwärts- (FBA) und den Rückwärtsbereich (BBA). Die Drähte sind im Zentralbereich parallel zur z -Achse gespannt. Das Eisenjoch wird durch die vordere (FEC) und die hintere Endkappe (BEC) abgeschlossen, in denen die Drähte parallel zur x -Achse verlaufen.

Diese vier Subdetektoren des Myonsystems sind des weiteren in 16 *Module* unterteilt, die jeweils wie folgt von 0 bis 15 durchnummeriert sind:

- im Zentralbereich entspricht jedem Modul ein halber Oktant;
- in den Endkappen liegen in der y - z -Ebene jeweils acht Module übereinander.

Die Modulnummern laufen im Myondetektor daher global von 0 bis 63, wobei die Zählung bei der hinteren Endkappe beginnt. Die Unterteilung des zentralen Myondetektors ist in der Abbildung 4.2 dargestellt.

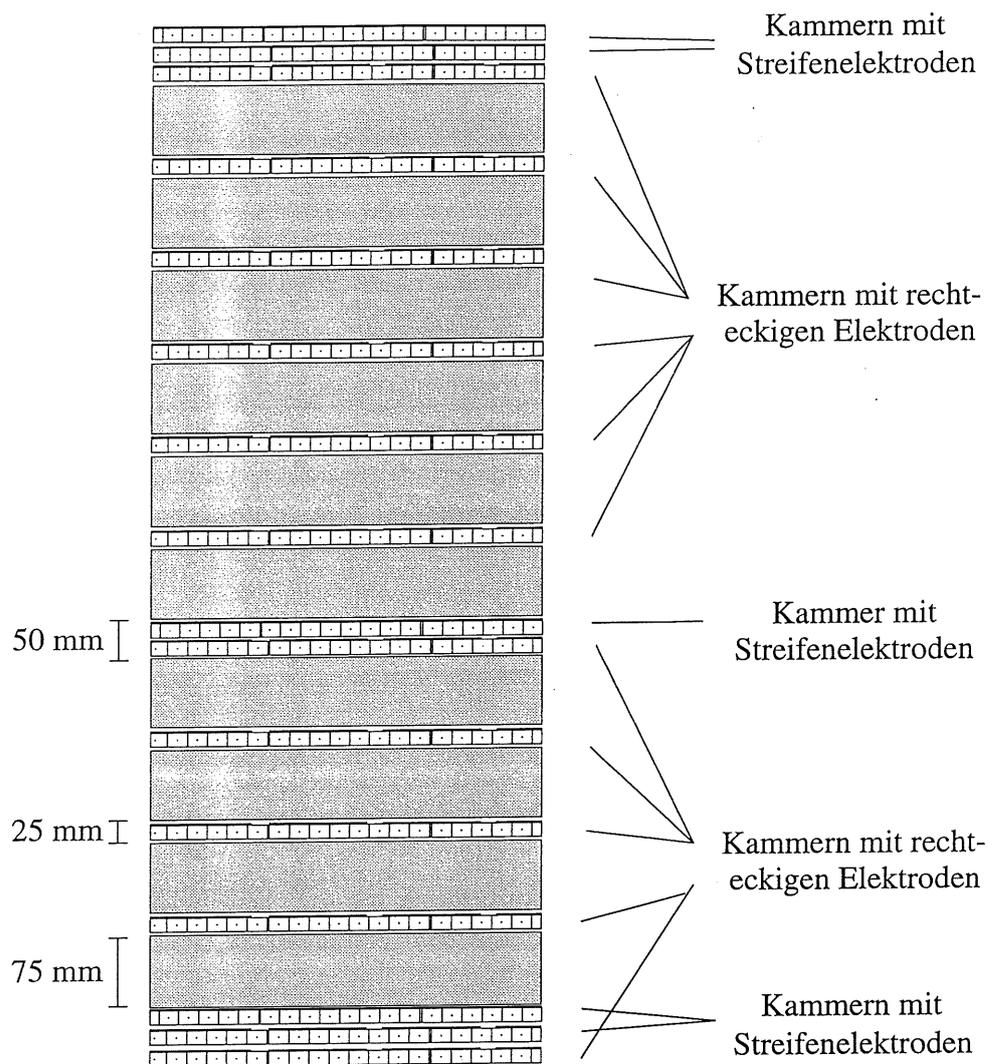


Abbildung 4.3: Die Struktur des instrumentierten Eisens

übergeordnete Ausleseeinheit weitergeleitet. Dadurch kommt ein Beitrag zur ersten Triggerstufe zustande.

Da im Zentralbereich die Lagenbreite nach außen hin kontinuierlich zunimmt und einzelne Lagen nur mit ganzen Elementen instrumentiert werden, ergeben sich nichtinstrumentierte Bereiche in Drahtlagen, die allerdings in den Modulen so verteilt sind, daß ein vom Wechselwirkungspunkt kommendes minimalionisierendes Teilchen höchstens einen dieser *Dummies* passiert. Ungefähr 5% des Zentralbereichs sind innerhalb der Module nicht instrumentiert. In den beiden Endkappen befinden sich innerhalb der Module keine nicht instrumentierten Bereiche.

4.5 Gas- und Hochspannungsversorgung

Die H1-Streamerrohrkammern werden von fünf Hochspannungsgeräten mit jeweils 40 Kanälen versorgt. Die Kanäle können zu geeigneten Gruppen zusammengefaßt und vom H1-Kontrollraum simultan überwacht und geregelt werden. Übersteigt der Strom eines Kanals für eine bestimmte Zeit die Grenze von $5 \mu A$ (stellenweise ist dieser Schwellenstrom höher gewählt), wird die Hochspannung für diesen Kanal automatisch reduziert, bis die Stromgrenze erreicht wird. Daraufhin wird die Hochspannung wieder dem nominellen Wert angeglichen — es sei denn, die Stromgrenze wird wieder überschritten. Gelingt es innerhalb einer wählbaren *Tripzeit* nicht, die Hochspannung eines Kanals dem nominellen Wert anzugleichen, wird der Kanal abgeschaltet. Bei einem Außen- druck von 1013 hPa beträgt die Betriebsspannung 4500 V . Die Betriebsspannung wird in Abhängigkeit von Druck, Temperatur und Ladungsspektrum in den Kammern reguliert. Um die Gasverstärkung konstant zu halten, wird der Luftdruck p permanent gemessen und die Hochspannung um die Größe ΔHV korrigiert, wobei [Itt93]

$$\Delta HV = \frac{3V}{\text{hPa}} \cdot (1013 \text{ hPa} - p). \quad (4.1)$$

Die Streamerrohrkammern werden über eine Gasmischanlage mit ca. 220 Leitungen mit Frischgas versorgt, dessen gleichmäßige Versorgung durch Flußmesser kontrolliert wird.

4.6 Datennahme

Die Datennahme bei den Streamerrohrkammern geschieht auf zwei verschiedene Arten: Die Datennahme der analogen Information erfolgt getrennt von der digitalen Information. Sowohl die Draht- als auch die Streifenlagensignale werden digital ausgelesen; die großflächigen Elektroden dagegen analog.

Bei der analogen Datennahme werden die großflächigen Elektroden übereinanderliegender Ebenen zu *Türmen* zusammengefaßt. Dabei bilden die ersten fünf Lagen den ersten, die restlichen Lagen den zweiten Turm.

Infolge der hohen Auslesefrequenz und der großen Zahl der Kanalnummern mußte ein neues Auslesesystem für die Draht- und die Streifenauslese entwickelt werden: Jeder Draht/Streifen ist mit einem Komparator, einem Synchronisator und einer *digitalen Pipeline* verbunden. In einem ersten Schritt werden die Drahtsignale über eine extern einstellbare Schwelle digitalisiert. Diese Signale werden anschließend mit der Zeitscheibenfrequenz¹ von HERA synchronisiert und in ein digitales Schieberegister

¹Da bei HERA die Elektronen- bzw. Positronenpakete (*Bunches* genannt) mit den Protonenbündeln alle 96 ns zur Kollision gebracht werden, ergibt sich diese Kollisionsfrequenz als Zeiteinheit von HERA. Dabei entspricht eine Zeitscheibe (ein sogenanntes *Bunch Crossing*) gerade 96 ns , also $1 \text{ bc} \hat{=} 96 \text{ ns}$.

(eine *digitale Pipeline*) eingespeist. Im weiteren Verlauf kann anhand des Datenmusters entschieden werden, ob eine Auslese der Zeitscheibe erfolgt [H193].

Die Datennahme geschieht mit Hilfe von *Auslesebussen*. Die Signale der Draht- bzw. Streifenlagen werden mit Hilfe der Auslesebusse gesammelt und anschließend an das digitale Schieberegister weitergeleitet. Man benötigt pro Modul des instrumentierten Eisens mehrere Auslesebusse, um die Daten in die übergeordnete Datennahmeeinheit zu transportieren: pro Drahtlage braucht man einen Auslesebus; pro Streifenlage maximal zwei.

Kapitel 5

Grundlagen der durchgeführten Untersuchungen

Die Qualität des Myonsystems als Komponente des H1-Detektors wird im wesentlichen bestimmt durch

- die Zuverlässigkeit der Spurrekonstruktion und
- die Triggerwahrscheinlichkeiten für minimalionisierende Teilchen, die das instrumentierte Eisen durchqueren.

Beide Größen hängen unmittelbar von der Nachweiswahrscheinlichkeit der Streamerrohrkammern ab, die wiederum von diversen äußeren Einflüssen — wie Druck, Temperatur und angelegter Hochspannung — abhängig sind. Berechnet man die Triggerwahrscheinlichkeit in Abhängigkeit von der Nachweiswahrscheinlichkeit einer einzelnen Lage, so erkennt man deutlich eine Abhängigkeit, wie aus Tabelle 5.1 ersichtlich ist.

Triggerbedingung	ϵ_{trig} bei $\epsilon = 70\%$	ϵ_{trig} bei $\epsilon = 80\%$	ϵ_{trig} bei $\epsilon = 90\%$
3 aus 5	83,70 %	94,21 %	99,15 %
4 aus 5	52,83 %	73,73 %	91,86 %
5 aus 5	16,81 %	32,77 %	59,05 %

Tabelle 5.1: Triggerwahrscheinlichkeiten ϵ_{trig} bei verschiedenen Lagennachweiswahrscheinlichkeiten ϵ

Betrachtet man z.B. die Triggerwahrscheinlichkeit unter der Bedingung, daß drei der fünf Triggerlagen ein Signal gegeben haben, so erkennt man in der Tabelle 5.1, daß sich die Triggerwahrscheinlichkeit ϵ_{trig} im gleichen Maße wie die Lagennachweiswahrscheinlichkeit ϵ ändert.

Die Untersuchung der Lagennachweiswahrscheinlichkeit ist deshalb wichtig für das Myonsystem des H1-Detektors. Kennt man die Abhängigkeiten der Nachweiswahrscheinlichkeiten von allen in Frage kommenden Parametern der Streamerrohrkammern, die

die einzelnen Lagen des instrumentierten Eisens bilden, so kann man Nachweiswahrscheinlichkeiten von minimalionisierenden Teilchen im Myonsystem vorhersagen. Des Weiteren lassen sich auch Aussagen über die Gasqualität treffen.

5.1 Definitionen

Als *Multiplizität* wird in dieser Arbeit die Zahl der pro Teilchendurchgang und Lage getroffen gemeldeten Drähte bezeichnet. Die *Lagennachweiswahrscheinlichkeit* ist die Wahrscheinlichkeit dafür, ein durch das instrumentierte Eisen gehendes, minimalionisierendes Teilchen (hauptsächlich Myonen) in einer bestimmten Lage von Streamerrohrkammern anzutreffen, d.h. die Wahrscheinlichkeit dafür, daß mindestens ein Draht/Streifen dieser Lage ein Signal abgegeben hat.

1. Die Nachweiswahrscheinlichkeit ϵ_{Lage} , ein Myon in einer Draht-/Streifenlage nachzuweisen, ist also gegeben durch das Verhältnis der Gesamtzahl $N_{\mu,ges}$ der Myonen, die die Lage passiert haben zu der Zahl $N_{\mu,det}$ der davon nachgewiesenen Myonen:

$$\epsilon_{Lage} = \frac{N_{\mu,det}}{N_{\mu,ges}}. \quad (5.1)$$

ϵ_{Lage} ist binomial verteilt mit einem statistischen Fehler $\sigma(\epsilon_{Lage})$ [Tof79] von

$$\sigma(\epsilon_{Lage}) = \sqrt{\frac{\epsilon_{Lage}(1 - \epsilon_{Lage})}{N_{\mu,ges}}}. \quad (5.2)$$

Wie man direkt aus der Gleichung für den statistischen Fehler ermittelt, müssen möglichst viele Ereignisse analysiert werden, um $\sigma(\epsilon_{Lage})$ zu minimieren.

2. Die Drahtmultiplizität $N_{Treffer}$, also die Zahl der pro Ereignis und Lage getroffen gemeldeten Drähte, ist eine Größe, die wesentlich zur Auflösung der zu rekonstruierenden Spuren durch das Myonsystem beiträgt. Diese Zahl kommt zustande durch:

- Photonen, die von der Streamerzelle des Myons gesetzt werden und in der Wand zwischen zwei Streamerrohrzellen zu einer Streamerbildung in der benachbarten Streamerrohrzelle führen,
- Ionisationselektronen, die nach der Ionisation eine so hohe Energie aufweisen, daß diese die Streamerrohrzelle verlassen und in einer Nachbarzelle eine Streamerzelle auslösen und
- durch elektronisches Übersprechen (*Crosstalk* genannt) werden benachbarte Drähte ebenfalls als getroffen deklariert.

Dabei ist mit $N_{Lage,Trefffer}$ die *mittlere* Multiplizität gemeint, also die *mittlere* Zahl der pro Ereignis und Lage getroffen gemeldeten Drähte:

$$N_{Lage,Trefffer} = n^{-1} \sum_{i=1}^n N_{i,hit}. \quad (5.3)$$

$N_{i,hit}$ ist die Zahl der bei dem Ereignis i in der betrachteten Lage getroffen gemeldeten Drähte, und n ist die Zahl der untersuchten Ereignisse.

Dieser Mittelwert der Multiplizität ist mit einem Fehler $\Delta(N_{Trefffer})$ behaftet, der sich als Standardabweichung des Mittelwertes — also als mittlerer quadratischer Fehler des Mittelwertes — zu [Kuc88]:

$$\Delta(N_{Trefffer}) = \frac{\sigma}{\sqrt{n}} = \sqrt{\frac{1}{n(n-1)} \sum_{i=1}^n (N_{i,hit} - N_{Trefffer})^2} \quad (5.4)$$

ergibt. Hierbei ist n die Zahl der untersuchten Ereignisse. $N_{i,hit}$ ist die Zahl der bei dem Ereignis i getroffen gemeldeten Drähte, und $N_{Trefffer}$ bedeutet die mittlere Multiplizität. σ ist die Varianz, die die Abweichung der Einzelwerte $N_{i,hit}$ vom Mittelwert $N_{Trefffer}$ angibt. Die Varianz σ ist definiert als mittlerer quadratischer Fehler der Einzelmessung [Kuc88]:

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (N_{i,hit} - N_{Trefffer})^2}. \quad (5.5)$$

Für die Richtigkeit einer bestimmten Verteilung der Meßwerte einer Stichprobe gibt es verschiedene Testmethoden, z.B. den χ^2 -Test. Der χ^2 -Test gestattet eine Wahrscheinlichkeitsaussage darüber, ob die festgestellte Häufigkeitsverteilung der n Meßwerte einer Stichprobe mit einer angenommenen Verteilung der Grundgesamtheit der Meßgröße x_i verträglich ist.

Die χ^2 -Verteilung ergibt sich nach folgender Formel [Tof79]:

$$\chi^2 = \sum_{i=1}^n \left(\frac{x_i - \bar{x}}{\sigma} \right)^2. \quad (5.6)$$

Die Varianz σ berechnet sich dabei als mittlerer quadratischer Fehler der Einzelmessung (s.o.) wie folgt [Kuc88]:

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}, \quad (5.7)$$

wobei n die Gesamtzahl der Meßwerte ist, x_i die einzelnen Meßpunkte sind, über die summiert wird; und \bar{x} ist der Mittelwert aus den einzelnen Meßwerten x_i .

Als Dichtefunktion der χ^2 -Verteilung ergibt sich folgende Gleichung [Tof79]:

$$f(\chi^2, n) = \frac{1}{2^{\frac{n}{2}} \cdot \Gamma\left(\frac{n}{2}\right)} \times (\chi^2)^{\frac{n}{2}-1} \times e^{-\frac{\chi^2}{2}}. \quad (5.8)$$

Falls die Variablen x_i miteinander korreliert sind, kann die χ^2 -Verteilung nicht mit der Gleichung 5.6 bestimmt werden, da der Korrelation Rechnung getragen werden muß. Dazu benötigt man die Fehlermatrix V des Systems. Die Hauptdiagonalelemente dieser $n \times n$ Matrix sind die Fehlerquadrate der Meßwerte x_i . Die nichtdiagonalen Einträge geben die Korrelationen zwischen den Variablen x_i an. Mit der symmetrischen, positiv definiten Kovarianzmatrix V ergibt sich die χ^2 -Verteilung wie folgt:

$$\chi^2 = (\vec{X} - \vec{\mu})^T V^{-1} (\vec{X} - \vec{\mu}). \quad (5.9)$$

Besteht keine Korrelation zwischen den Variablen x_i , so geht Gleichung 5.9 in die Gleichung 5.6 über.

Jedem Einzelereignis x_i kann eine Wahrscheinlichkeit $P(\chi^2)$ zugeordnet werden, daß man beim nächsten Ereignis einen größeren χ^2 -Wert erhält, indem man die Dichtefunktion (Gleichung 5.8) von χ^2 bis ∞ integriert:

$$P(\chi^2) = \int_{\chi^2}^{\infty} f(Z, N) dZ. \quad (5.10)$$

Um ein leichteres Verständnis der Abbildungen und der Sachverhalte zu ermöglichen, werden auch des weiteren in den Abbildungen und im Text die Größen aus der Tabelle 5.2 verwendet.

Größen	Bedeutung
$\varepsilon(x)$	Mittlere Nachweiswahrscheinlichkeit der Lage x
$N_{Treffer}$	Mittlere Multiplizität pro Ereignis und Lage
χ^2	χ^2 -Verteilung
ndf	Zahl der Freiheitsgrade
A_0	Ordinatenwert einer Geraden durch die Einträge
A_1	Steigung einer Geraden durch die Einträge

Tabelle 5.2: Definitionen der in dieser Arbeit relevanten Größen

5.2 Verwendete Myonen

Die Untersuchungen dieser Diplomarbeit befassen sich mit dem zentralen Myondetektor, d.h. es werden die beiden Endkappen und der Zentralbereich untersucht. Dazu werden

- *kosmische Myonen* zur Untersuchung der Zentralbereichsmodule verwendet. Myonen aus kosmischer Höhenstrahlung, die bei Luftschauerprozessen entstehen, treffen den H1-Detektor mit einer Rate von etwa 2 kHz . Ein Teil dieser kosmischen Myonen (ca. 13 Hz) durchquert das Spurkammersystem in der Nähe des e - p -Wechselwirkungspunktes und wird vom Triggersystem (CIP-4) akzeptiert.

Die Signatur kosmischer Myonen im H1-Detektor ähnelt der von Reaktionen, bei denen Myonpaare in Photon-Photon-Kollisionen produziert werden (vgl. Kapitel 2.3).

Kosmische Myonen weisen (da sie naturgemäß vorwiegend von oben in den Detektor einfallen) nur eine geringe Statistik in den Endkappen auf.

- *Strahl-Halo-Myonen* werden zur Untersuchung der vorderen und der hinteren Endkappe verwendet. Diese entstehen durch eine Wechselwirkung des einlaufenden Protons, welches nicht mit einem Elektron kollidiert sondern mit einem im Strahlrohr befindlichen Restgasatom. Dabei können Myonen entstehen, die dann im H1-Detektor nachgewiesen werden können.

Da Strahl-Halo-Myonen allerdings vornehmlich parallel zum Strahl verlaufen, weisen sie kaum Durchgänge durch die Zentralbereichsmodule auf. Zusätzlich decken Strahl-Halo-Myonen nur einen sehr kleinen Einfallswinkelbereich in den Endkappenmodulen ab.

5.3 Abhängigkeiten

Im folgenden Kapitel sollen die Multiplizität und Nachweiswahrscheinlichkeit der Draht- und der Streifenlagen untersucht werden. Im wesentlichen sollen vier Abhängigkeiten der Lagennachweiswahrscheinlichkeit und der Multiplizität untersucht werden:

- von der auf die Flugzeit korrigierten Zeit t_0 (wobei t_0 der Zeitpunkt ist, an dem das betrachtete Myon den kleinsten Abstand zum e - p -Wechselwirkungspunkt hat),
- vom Impuls,
- von der Steigung $\cotan(\theta)$ (vgl. Abbildung 5.1) zwischen der Teilchenspur und der Drahttrichtung (im folgenden mit Steigung *senkrecht zu den Streifen* — in den Abbildungen mit „Streifenwinkel“ — abgekürzt) und
- von der Steigung $\tan(\phi)$ (vgl. Abbildung 5.1) zwischen der Teilchenspur und der Flächennormalen der betrachteten Drahtlagenebene senkrecht zu den Drähten der Streamerrohrkammern in der x - y -Ebene (im folgenden mit Steigung *senkrecht zu den Drähten* — in den Abbildungen mit „Drahtwinkel“ — abgekürzt).

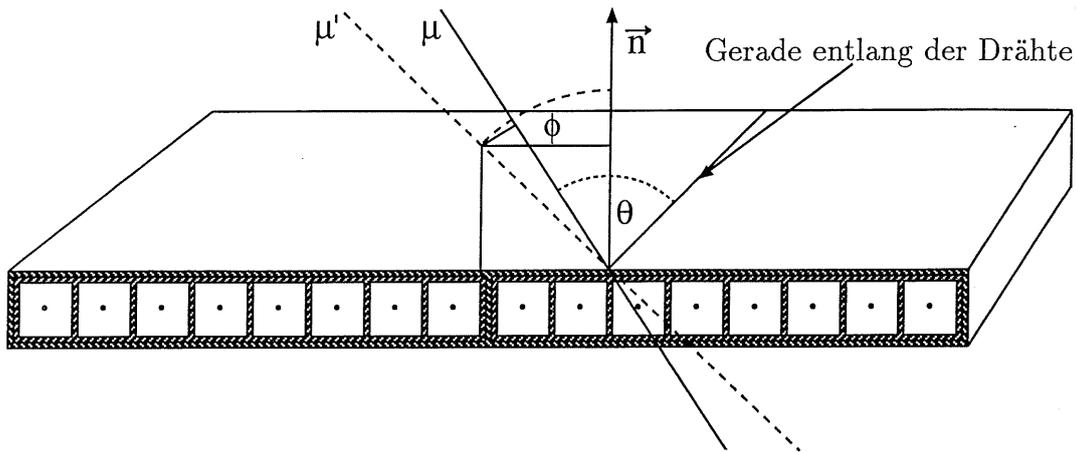


Abbildung 5.1: Definition des Einfallswinkels senkrecht zu den Streifen (θ) und senkrecht zu den Drähten (ϕ)

Bei der Untersuchung der Abhängigkeit vom Impuls erwartet man bei Teilchendurchgängen von Myonen mit Impulsen, die kleiner als etwa 10 GeV sind, keine systematische Abhängigkeit. Bei höheren Energien, und damit größeren Impulsen der durchgehenden minimalionisierenden Partikel, sollte ein Anstieg der Multiplizität durch Ionisationselektronen zu registrieren sein. Der Impuls wird in dieser Arbeit aus der Spurkrümmung berechnet. Die Spurkrümmung wird dabei mit Hilfe der zentralen Spurkammer bestimmt und aus der CTKR-Datenbank¹ ermittelt, in der einige Parameter der zentralen Spurkammer gespeichert sind.

Anders verhält es sich bei der Abhängigkeit von der auf die Flugzeit korrigierten Zeit t_0 und bei den Winkelabhängigkeiten:

- Anders als bei Ereignissen, die durch eine $e-p$ -Wechselwirkung in der Vertexregion entstehen, ist das Auftreten der verwendeten Myonen (vgl. Kapitel 5.2) nicht mit den Teilchenkollisionen synchronisiert. Kosmische Myonen treffen zu allen Zeiten den H1-Detektor. Bei Strahl-Halo-Myonen ist das Durchqueren des Detektors mit dem Protonenstrahl korreliert. Bei den in dieser Arbeit verwendeten Strahl-Halo-Myonen war die Datennahmefrequenz nicht mit der Umlauffrequenz der Protonenpakete synchronisiert, so daß auch die verwendeten Strahl-Halo-Myonen zu allen Zeiten den H1-Detektor durchqueren.

Bei der Ermittlung der Zeit, zu der das Myon den kleinsten Abstand zu dem $e-p$ -Wechselwirkungspunkt hat, muß zusätzlich — sowohl bei kosmischen Myonen als auch bei Strahl-Halo-Myonen — die Zeit t_0 auf die Flugzeit korrigiert werden: Kosmische Myonen fallen im allgemeinen von oben in den Zentralbereich ein; Strahl-Halo-Myonen durchqueren zuerst die hintere Endkappe. Beide Arten

¹Die rekonstruierten Daten werden bei H1 grundsätzlich mit Hilfe von Datenbankstrukturen gespeichert, die dann für Anwender zugänglich sind [Blo87].

von Myonen haben eine (zum Teil) umgekehrte Zeitabfolge zu „normalen“ Ereignissen, die mit dem H1-Detektor untersucht werden und aus einer Kollision zwischen Protonen und Positronen am $e-p$ -Wechselwirkungspunkt hervorgehen.

Da bei einer bestimmten Zeit t die Datennahme ausgelöst wird, ist klar, daß Ereignisse, die zu einer Zeit t_0 den $e-p$ -Wechselwirkungspunkt passieren, die erheblich von der Zeit t differiert, *nicht* ausgelesen werden.

Um diesem Effekt Rechnung zu tragen, werden in den durchgeführten Untersuchungen nur Ereignisse betrachtet, die innerhalb eines bestimmten Zeitintervalls liegen. Damit ist gewährleistet, daß die Nachweiswahrscheinlichkeit der untersuchten Ereignisse maximal ist (wegen der Beschränkung auf ein Zeitintervall).

- Man erwartet ebenfalls eine Abhängigkeit der Lagennachweiswahrscheinlichkeit von der Steigung *senkrecht zu den Streifen* (dem „Streifenwinkel“) nach dem Modell, das der Simulation zugrunde gelegt wurde [Her89]. Diese Abhängigkeit kommt dadurch zustande, daß die Spur eines minimalionisierenden Teilchens in *Streamerzellen* zerlegt wird. Der hochgradig ionisierte Bereich zwischen Kammerwand und Draht wird dabei als *Streamerzelle* bezeichnet. Jede Streamerzelle ist in der Lage, ein Signal auf dem Draht der Streamerrohrzelle auszulösen. In Testmessungen hat man herausgefunden, daß diese Streamerzellen $0,3\text{ cm}$ lang sind [Zit92]. Bei steigendem Einfallswinkel θ senkrecht zu den Streifen können mehr Streamerzellen in eine Streamerröhre gelegt werden. Es ist deshalb anzunehmen, daß mit größer werdender Steigung $\cotan(\theta)$ *senkrecht zu den Streifen* die Lagennachweiswahrscheinlichkeit zunimmt [Kra92].
- Bei der Abhängigkeit der Lagennachweiswahrscheinlichkeit von der Steigung *senkrecht zu den Drähten* (dem „Drahtwinkel“) geht man davon aus, daß die 1 mm dicken Wände, die die einzelnen Streamerrohrzellen in einem Element des instrumentierten Eisens voneinander trennen, Ineffizienzen verursachen. Man erwartet deshalb bei senkrechtem (und nahezu senkrechtem) Einfall eines minimalionisierenden Partikels in die Module des Myonsystems eine Abnahme der Lagennachweiswahrscheinlichkeit.

Für ein senkrecht durch eine Drahtlage gehendes Myon (Einfallswinkel senkrecht zu den Drähten: $\phi = 0^\circ$) ergibt sich aus diesen Überlegungen für die geometrische Lagennachweiswahrscheinlichkeit als Quotient der aktiven Breite b_{akt} und der Gesamtbreite b_{tot} der Elemente mit den ineffizienten Streamerrohrbereichen:

$$\varepsilon_0 = \varepsilon_{geom}(\phi=0^\circ) = \frac{b_{akt}}{b_{tot}} = \frac{16 \cdot 9,0\text{ mm}}{166,6\text{ mm}} = 0,864. \quad (5.11)$$

Trifft ein Myon unter *schrägem* Einfall (Einfallswinkel senkrecht zu den Drähten: $\tan|\phi| > \left(\frac{1}{9}\right)$) auf die Streamerrohrkammern, so trifft das Myon immer auch aktives Volumen (also Bereiche außerhalb der Ineffizienzen, die durch die Streamerrohrwände verursacht werden), so daß es zu einem Signal auf dem Draht der durchquerten Streamerrohrzelle kommen kann. Bei schrägem Einfall sind die

Ineffizienzen, die durch die Streamerrohrwände entstehen, demnach nicht zu registrieren [Kra92].

Allerdings sollte bei schrägem Einfall ($|\phi| > 0^\circ$) die Spurlänge im aktiven Volumen einer Streamerröhre zu einer Abhängigkeit führen: Je größer der Einfallswinkel ϕ ist, desto größer ist die mittlere Spurlänge in einer Streamerrohrzelle. Nimmt man an, daß eine minimale Spurlänge im aktiven Volumen einer Streamerrohrzelle zur Ausbildung einer Streamerentladung notwendig ist, dann sollte die Lagennachweiswahrscheinlichkeit mit dem Betrag des Einfallswinkels ϕ ansteigen.

Korreliert mit der Abhängigkeit der *Lagennachweiswahrscheinlichkeit* von dem Einfallswinkel ϕ — bedingt durch eine minimale Spurlänge im aktiven Volumen einer Streamerrohrzelle — ist auch eine Abhängigkeit der *Drahtlagenmultiplizität* von dieser minimalen Spurlänge: Die Drahtlagenmultiplizität sollte ebenfalls mit dem Betrag des Einfallswinkels ϕ ansteigen.

5.4 Monte-Carlo Simulation

Um zu einem Verständnis eines Detektors zu gelangen, ist es notwendig, sich ein Bild von den physikalischen Reaktionen zu machen, die in dem Detektor beobachtet werden. Dazu werden physikalische Ereignisse mit einem *Monte-Carlo Generator* erzeugt. Ein Generator liefert die Vierervektoren von Teilchen, die in dem Detektor entstehen können. Mit einem speziellen Programm [Mey91] kann der Einfluß, den der Detektor auf Teilchen ausübt, bei den generierten Vierervektoren simuliert werden. Als Ergebnis erhält man Daten, die einem realen Ereignis, das in dem Detektor stattgefunden hat, entsprechen.

Bei der Simulation finden die Detektorgeometrie, die Wechselwirkung mit Materie (wie Energieverlust, Vielfachstreuung und Paarerzeugung), die Wirkung des Magnetfeldes, die Wechselwirkung mit den sensitiven Nachweiskomponenten des Detektors und die Funktionsweise der Trigger Berücksichtigung.

Besonderes Interesse gilt in dieser Arbeit der Simulation der sensitiven Volumina des zentralen Myonsystems. So sollen z.B. die Drähte der Streamerrohrkammern nur dann ansprechen, wenn ein geladenes Teilchen eine Mindestspurlänge vorweisen kann. Derartige Kriterien werden durch Testmessungen an Prototypen der Detektorkomponenten ermittelt [Zit92].

Auch die in Kapitel 5.3 angesprochenen Abhängigkeiten sollen in der Simulation des Detektors Berücksichtigung finden. Vor allem die Winkelabhängigkeit sowohl *senkrecht zu den Drähten* als auch *senkrecht zu den Streifen* kann simuliert werden:

- Die Winkelabhängigkeit *senkrecht zu den Streifen* wird (unter anderem) durch die Länge der Streamerzellen simuliert.

- Der Winkelabhängigkeit *senkrecht zu den Drähten* wird dadurch Rechnung getragen, daß die Wandstärke und die minimale Spurlänge im aktiven Volumen einer Streamerröhre in dem Simulationsprogramm variiert werden kann.
- Des weiteren kann z.B. die mittlere Lagennachweiswahrscheinlichkeit vordefiniert werden. Der maximale Abstand zwischen Streamerzelle und Streifenelektrode kann vorgegeben werden und die minimale Ladung, die auf einer Streifenelektrode induziert werden muß, kann variiert werden.

Mit Hilfe dieser Größen versucht man den H1-Detektor möglichst gut zu simulieren, um die realen Daten genau beschreiben zu können. Treten Abweichungen bei dem Vergleich zwischen realen Daten und den Monte-Carlo simulierten Daten auf, so muß die Monte-Carlo Simulation korrigiert werden.

In dieser Arbeit sollen — in Kapitel 6.3 — die Daten, die bei realen Ereignissen auftreten mit Ereignissen aus der Monte-Carlo Simulation verglichen werden. Sollten dabei Diskrepanzen auftreten, so soll anschließend geklärt werden, womit diese zu begründen sind. Vor allem sollen die untersuchten Abhängigkeiten von Multiplizität und Lagennachweiswahrscheinlichkeit bei realen Myonen den entsprechenden Abhängigkeiten bei Myonen aus der Monte-Carlo Simulation gegenübergestellt werden.

5.5 Analyse

Die für die Analyse wichtigen Überlegungen sollen in diesem Teil des Kapitels vorgestellt werden. Dabei soll vor allem die Funktionsweise des Analyseprogramms erklärt werden.

5.5.1 Winkelbestimmung im Zentralbereich und in den Endkappen

Zur Bestimmung der Einfallswinkel von Myonspuren in die Module des instrumentierten Eisens werden die Zentralbereichsmodule und die Endkappenmodule getrennt betrachtet.

- Bei den Zentralbereichsmodulen gilt:
 - für den Einfallswinkel senkrecht zu den Streifen („Streifenwinkel“): Dieser entspricht genau dem Polarwinkel θ , den die Myonspur beim Eintritt in die Eisenmodule im H1-Koordinatensystem hat, also dem Polarwinkel der rekonstruierten Spur im Eisen θ_{REC} :

$$\theta = \theta_{REC} \quad (5.12)$$

- für den Einfallswinkel senkrecht zu den Drähten („Drahtwinkel“):
Dieser hängt von dem Azimutalwinkel ϕ ab, den die Myonspur beim Eintritt in die Eisenmodule im H1-Koordinatensystem hat, also dem Azimutalwinkel der rekonstruierten Spur im Eisen ϕ_{REC} . Es muß berücksichtigt werden, daß die Module im Zentralbereich oktagonale angeordnet sind. Deshalb muß ϕ_{REC} auf diese oktagonale Struktur des Zentralbereichs korrigiert werden, je nachdem, welches Zentralbereichsmodul $n_{(Oktant)}$ von der Myonspur durchdrungen wird:

$$\phi = \phi_{REC} \pm n_{(Oktant)} \cdot \left(\frac{\pi}{4}\right). \quad (5.13)$$

- Bei den Endkappenmodulen gilt:

- für den Einfallswinkel *senkrecht zu den Streifen* („Streifenwinkel“):
Da die Drähte in den Endkappen parallel zur x -Achse des H1-Koordinatensystems verlaufen, ist die Steigung $\frac{dx}{dz}$ ein Maß für die Steigung in den Endkappenmodulen *senkrecht zu den Streifen*:

$$\frac{dx}{dz} = \tan(\theta_{REC}) \cdot \cos(\phi_{REC}) \quad (5.14)$$

- für den Einfallswinkel *senkrecht zu den Drähten* („Drahtwinkel“):
Entsprechend ist die Steigung $\frac{dy}{dz}$ ein Maß für die Steigung in den Endkappenmodulen *senkrecht zu den Drähten*:

$$\frac{dy}{dz} = \tan(\theta_{REC}) \cdot \sin(\phi_{REC}). \quad (5.15)$$

5.5.2 Korrekturen der Lagenachweiswahrscheinlichkeit

Die Lagenachweiswahrscheinlichkeit stellt die wichtigste Untersuchungsgröße in dieser Diplomarbeit dar. Daher ist es nötig, diese auf folgende Einflüsse zu korrigieren:

- „noisy“ Drähte, also Drähte, die permanent ein Signal liefern,
- *nicht instrumentierte Bereiche* des zentralen Myonsystems (*Dummies*) und
- „tote“ Drähte, also Drähte, die aus technischen Gründen kein Signal geben können.

Dabei wird für jeden Draht/Streifen, der getroffen gemeldet wurde, die spezielle Drahtnummer ermittelt, und in dem Analyseprogramm wird überprüft, ob der Draht mit dieser Nummer „noisy“ ist, indem diese Information aus der Datenbank IQWS² ausgelesen

²IQWS bezeichnet die BOS-Datenbank, in der Informationen bezüglich der Qualität aller Drähte und Streifenelektroden des zentralen Myondetektors gespeichert sind, z.B. Angaben darüber, ob ein Draht/Streifen permanent ein Signal liefert oder aus technischen Gründen kein Signal geben kann.

wird. Ist dies der Fall, wird der betrachtete Draht zur Bestimmung der Lagennachweiswahrscheinlichkeit nicht verwendet.

Diffiziler ist die Überprüfung, ob nicht instrumentierte Bereiche bzw. „tote“ Drähte, dazu geführt haben, daß in einer bestimmten (Draht- oder Streifen-) Lage keine Einträge zu verzeichnen sind. Für diese beiden Fälle läßt sich nämlich der genaue räumliche Bereich bzw. die spezielle Drahtnummer nicht trivial ermitteln, so daß man nicht instrumentierte Bereiche und „tote“ Drähte nicht genauso einfach wie „noisy“ Drähte ermitteln kann.

Das Problem der Überprüfung, ob „tote“ Drähte bzw. nicht instrumentierte Bereiche Ursache dafür waren, daß von einer Lage, die von einem Myon passiert wurde, kein Signal registriert wurde, wird in dem Analyseprogramm wie folgt gelöst: Stellt das Programm fest, daß eine Draht-/Streifenlage von einem Myon passiert wurde, aber kein Draht getroffen gemeldet wurde, so wird diese spezielle Lage genauer untersucht.

Dazu werden die Koordinaten des Durchgangs des Myons durch diese Lage aus den Spurkoordinaten bestimmt. Die Drahtnummer des ersten Drahtes bzw. die Nummer des ersten Streifens dieser Lage wird berechnet, und daraus werden die Koordinaten des betrachteten Drahtes/Streifens bestimmt. Aus diesen ermittelten Koordinaten wird der Abstand zwischen dem betrachteten Draht/Streifen und dem Durchgang des Myons durch diese spezielle Lage berechnet.

Unterschreitet dieser berechnete Abstand einen bestimmten Wert Δd_{crit} , der festlegt, bis zu welchem Abstand zwischen Durchgang des Myons durch die Lage und Streamerrohrzelle ein Draht/Streifen ein Signal überhaupt abgeben kann, dann wird untersucht, ob dieser Draht/Streifen „tot“ war (es werden ebenfalls ausschließlich getroffen gemeldete Drähte als effizient gewertet, die *innerhalb* des Abstandes Δd_{crit} auftreten).

Wird dieser Abstand nicht unterschritten, dann wird der zweite Draht/Streifen der betrachteten Lage untersucht. Wiederum wird der Abstand zwischen diesem Draht/Streifen und dem Durchgangspunkt des Myons durch die betrachtete Lage berechnet und erneut überprüft, ob der Abstand den Wert von Δd_{crit} unterschreitet.

Es ist klar, daß die Lagennachweiswahrscheinlichkeit eine von Δd_{crit} abhängige Größe ist. Legt man nämlich ein sehr kleines Δd_{crit} fest, dann werden auch Drähte/Streifen, die eigentlich getroffen gemeldet wurden, nicht zur Bestimmung der Lagennachweiswahrscheinlichkeit ϵ_{Lage} verwendet, weshalb ϵ_{Lage} sehr klein wird. Wählt man umgekehrt einen sehr großen Wert Δd_{crit} , dann werden auch Treffer, die von der Spur entfernt liegen, und nicht auf diese zurückzuführen sind, in die Bestimmung der Lagennachweiswahrscheinlichkeit einbezogen, was zu einer Überhöhung von ϵ_{Lage} führt.

Der Abstand Δd_{crit} wurde für Draht- und Streifenlagen separat bestimmt. Dazu wurde die Abhängigkeit der mittleren Nachweiswahrscheinlichkeit von Drahtlagen, ϵ_{Draht} , und von Streifenlagen, $\epsilon_{Streifen}$, in Abhängigkeit von Δd_{crit} berechnet (vgl. Tabelle 5.3).

Man liest in der Tabelle 5.3 ab, daß die mittlere Nachweiswahrscheinlichkeit sowohl der Drahtlagen ϵ_{Draht} als auch der Streifenlagen $\epsilon_{Streifen}$ mit größer werdendem Abstand Δd_{crit} ein Plateau erreicht. Aufgrund dieser Untersuchungen wurde für den Abstand Δd_{crit} der Draht- und der Streifenlagen ein Wert gewählt, der auf diesem Plateau

Δd_{crit}	ϵ_{Draht}	$\epsilon_{Streifen}$
0,1 cm	13,19 %	1,822 %
0,5 cm	66,35 %	71,33 %
0,75 cm	75,53 %	91,81 %
1,0 cm	79,48 %	98,95 %
2,0 cm	80,11 %	99,51 %
3,0 cm	80,23 %	99,57 %

Tabelle 5.3: Untersuchung der Nachweiswahrscheinlichkeit für Draht- und Streifenlagen — abhängig von Δd_{crit}

liegt: Für die Drahtlagen wurde der Abstand $\Delta d_{crit} = 1,0 \text{ cm}$ gewählt, für die Streifenlagen der Abstand $\Delta d_{crit} = 2,0 \text{ cm}$.

Die Abstände zwischen den Drähten/Streifen und dem Durchgang des Myons durch die betrachtete Lage werden so lange ermittelt, bis entweder der ermittelte Abstand zwischen dem Draht/Streifen und dem Durchgangspunkt des Myons durch die Lage den Wert von Δd_{crit} unterschreitet, oder bis der Abstand der nachfolgenden Drähte/Streifen zu dem Durchgangspunkt des Myons durch die Lage wieder größer wird.

Im letzteren Fall, also wenn der Abstand wieder größer wird, wird überprüft, ob der Bereich in einem Abstand von Δd_{crit} vor und hinter dem Durchgangspunkt des Myons durch die Lage überhaupt mit Streamerrohren instrumentiert wurde. Ist dies nicht der Fall, hat das Analyseprogramm einen nicht instrumentierten Bereich — einen *Dummy* — gefunden.

Variablenname	Bedeutung
$(x_{wire}, y_{wire}, z_{wire})$	Koordinaten des Drahtes im H1-System
$(x_{track}, y_{track}, z_{track})$	Koordinaten der rekonstruierten Spur im H1-System
$(\tilde{x}_{wire}, \tilde{y}_{wire}, \tilde{z}_{wire})$	Koordinaten des Drahtes im Oktagonssystem
$(\tilde{x}_{track}, \tilde{y}_{track}, \tilde{z}_{track})$	Koordinaten der rekonstruierten Spur im Oktagonssystem
$\tan(\psi_{trackslope})$	Steigung der Spur im Oktagonssystem
ϕ_{track}	azimutaler Steigungswinkel der Spur im instrumentierten Eisen
θ_{track}	polarer Steigungswinkel der Spur im instrumentierten Eisen
$\tilde{\phi}_{track}$	azimutaler Steigungswinkel der Spur im Oktagonssystem
$\tilde{\theta}_{track}$	polarer Steigungswinkel der Spur im Oktagonssystem

Tabelle 5.4: Definition der in den Formeln 5.16 bis 5.19 verwendeten Variablen

Für die Abstände Δd zwischen dem betrachteten Draht/Streifen und dem Durchgangspunkt des Myons durch die Lage ergeben sich für den Zentralbereich, die beiden Endkappen und für die Draht- und Streifenlagen — mit den Definitionen der Variablen aus der Tabelle 5.4³ — folgende vier Gleichungen:

³Das *Oktagonssystem* ist dabei dasjenige Koordinatensystem, in dem die Abszisse parallel zu den Eisenschlitzen des getroffenen Moduls verläuft. Die Ordinate entspricht der Flächennormalen zu der Grundfläche des Moduls, das von dem Myon durchquert wurde.

- bei den Drahtlagen:

- für die Zentralbereichsmodule:

$$\Delta d_{wire,barrel} = \tilde{y}_{track} + \tan(\psi_{trackslope}) \cdot (\tilde{x}_{wire} - \tilde{x}_{track}) - \tilde{y}_{wire} \quad (5.16)$$

- für die Endkappenmodule:

$$\Delta d_{wire,endcaps} = y_{track} + (\tan(\theta_{track}) \cdot \sin(\phi_{track})) \cdot (z_{wire} - z_{track}) - y_{wire} \quad (5.17)$$

- bei den Streifenlagen:

- für die Zentralbereichsmodule:

$$\Delta d_{strip,barrel} = \tilde{z}_{track} + (\cotan(\tilde{\theta}_{track}) \cdot \cos(\tilde{\phi}_{track}) \cdot (\tilde{x}_{wire} - \tilde{x}_{track})) - \tilde{z}_{wire} \quad (5.18)$$

- für die Endkappenmodule:

$$\Delta d_{strip,endcaps} = x_{track} + (\tan(\theta_{track}) \cdot \cos(\phi_{track}) \cdot (z_{wire} - z_{track})) - x_{wire} \quad (5.19)$$

5.5.3 Funktionsweise des Analyseprogramms

Um sicherzustellen, daß die Lage, deren Nachweiswahrscheinlichkeit bestimmt werden soll, tatsächlich von einem minimalionisierenden Teilchen passiert wurde, wird zum einen der Durchgang eines minimalionisierenden Teilchens mit Hilfe der rekonstruierten Spur im instrumentierten Eisen bestimmt⁴, zum anderen werden

- für die Bestimmung der Nachweiswahrscheinlichkeit der *Drahtlagen* nur die benachbarten Drahtlagen 6 und 7 betrachtet. Für die Bestimmung der Nachweiswahrscheinlichkeit der Drahtlage 6 wird verlangt, daß in der Drahtlage 7 ein Draht getroffen gemeldet wurde bzw. umgekehrt.

Die Nachweiswahrscheinlichkeit der Drahtlage 6 bzw. der Drahtlage 7 berechnet sich also wie folgt:

$$\varepsilon_{(6)} = \frac{N_{\mu,(7)}}{N_{\mu,(6+7)}} \quad (5.20)$$

$$\varepsilon_{(7)} = \frac{N_{\mu,(6)}}{N_{\mu,(6+7)}} \quad (5.21)$$

⁴Für die Rekonstruktion einer Spur im instrumentierten Eisen müssen mindestens drei Drahtlagen und entweder eine Streifenlage oder ein *Turm* (vgl. Kapitel 4.6) getroffen gemeldet werden.

mit den zugehörigen Fehlern $\sigma(\varepsilon_{(6)})$ bzw. $\sigma(\varepsilon_{(7)})$, für die gilt:

$$\sigma(\varepsilon_{(6)}) = \sqrt{\frac{\varepsilon_{(6)}(1 - \varepsilon_{(6)})}{N_{\mu,(7)}}} \quad (5.22)$$

$$\sigma(\varepsilon_{(7)}) = \sqrt{\frac{\varepsilon_{(7)}(1 - \varepsilon_{(7)})}{N_{\mu,(6)}}} \quad (5.23)$$

- Für die Bestimmung der Nachweiswahrscheinlichkeit der *Streifenlagen* wird ein getroffen gemeldeter Draht in einer der Drahtlagen verlangt, die ein Signal bei den Streifenlagen induzieren können.

Da mit Hilfe der Türme eine Ortsbestimmung durchgeführt wird, wird insbesondere für die Bestimmung der Nachweiswahrscheinlichkeit der Streifenlagen verlangt, daß beide Türme ein Signal abgeben haben, um zu gewährleisten, daß im Zentralbereich die z -Koordinate der Streifen bestimmt werden kann, in den Endkappen die x -Koordinate.

Die Nachweiswahrscheinlichkeit der Streifenlagen berechnet sich mit Hilfe der Formel 5.1 aus Kapitel 5.1, wobei die beiden obigen Bedingungen Berücksichtigung finden.

Kapitel 6

Ergebnisse der Untersuchungen

Um die Abhängigkeiten der Multiplizität und Lagennachweiswahrscheinlichkeit zu untersuchen, wurden die zu untersuchenden Größen gegen die Multiplizität bzw. Lagennachweiswahrscheinlichkeit aufgetragen und überprüft, ob systematische Abhängigkeiten zu konstatieren sind. Vor allem wurde versucht, die im voranstehenden Kapitel beschriebenen Abhängigkeiten der Lagennachweiswahrscheinlichkeit von den Einfallswinkeln in die Streamerrohrkammern zu verifizieren.

Die Ergebnisse dieser Untersuchungen sollen Monte-Carlo simulierten Myonen gegenübergestellt werden, um zu vergleichen, ob die bisherige Vorstellung, wie sich die Abhängigkeiten im H1-Detektor auswirken, den tatsächlichen Daten in ausreichendem Maße gerecht wird.

Für die Untersuchung der Zentralbereichsmodule wurden — wie schon erwähnt — kosmische Myonen verwendet. Für die Untersuchung der Endkappenmodule wurden zusätzlich Strahl-Halo-Myonen verwendet.

6.1 Untersuchungsergebnisse für kosmische Myonen

Bei den Untersuchungen mit kosmischen Myonen wurden vornehmlich Myonen aus den speziellen Dateneinheiten (*runs*) 87124, 87127 und 87128 verwendet, die ausschließlich kosmischen Myonen enthalten. Diese Myonen werden mit dem zentralen Spurtriggermechanismus der inneren Proportionalkammer (CIP) selektiert; man nennt sie deshalb auch *CIP-4-kosmische Myonen*.

Zu jedem Ereignis, das mit dem H1-Detektor untersucht wird, wird (falls dies möglich ist) eine Zeit t_0 bestimmt, zu der dieses Ereignis den kleinsten Abstand zum $e-p$ -Wechselwirkungspunkt hat. Die Zeit t_0 kann für kosmische Myonen mit Hilfe der in-

neren Jetkammer (CJC) bestimmt werden; sie wird deshalb im folgenden mit $t_{0(\text{CJCC})}$ bezeichnet¹.

Da kosmische Myonen von oben in den Detektor einfallen, ist die Zeitabfolge in der oberen Hälfte des Zentralbereichs umgekehrt zu „normalen“ Ereignissen, die mit dem H1-Detektor untersucht werden und aus einer Kollision zwischen Protonen und Positronen am Wechselwirkungspunkt hervorgehen: Kosmische Myonen, die durch die inneren Spurkammern gehen, haben *vorher* das instrumentierte Eisen passiert. Dadurch wird eine falsche Zeit $t_{0(\text{CJCC})}$ bestimmt, die — will man diese in Untersuchungen verwenden — mit der Flugzeit t_{flight} korrigiert werden muß.

Für Spuren kosmischer Myonen, die von oben auf den Vertex weisen (also aus der $+y$ -Richtung kommen), gilt für den Zeitpunkt t_0 , an dem das betrachtete Myon den kleinsten Abstand zum e - p -Wechselwirkungspunkt hat:

$$t_0 = t_{0(\text{CJCC})} - t_{flight} = t_{0(\text{CJCC})} - \frac{\sqrt{x^2 + y^2 + z^2}}{1440,0 \frac{\text{cm}}{\text{bc}}}, \quad (6.1)$$

wobei x , y und z die Koordinaten der Myonspur im instrumentierten Eisen sind, und $1440,0 \frac{\text{cm}}{\text{bc}}$ entspricht der halben Vakuumlichtgeschwindigkeit.

6.1.1 Multiplizität für Draht- und Streifenlagen

Bei den Untersuchungen betreffend der Multiplizität von kosmischen Myonen in den Streamerrohrkammern wurden die Abhängigkeiten von:

- der Lagenummer,
- der Modulnummer,
- dem Impuls,
- dem Einfallswinkel in die Streamerrohrkammern senkrecht zu den Streifen und
- dem Einfallswinkel in die Streamerrohrkammern senkrecht zu den Drähten

untersucht.

1. Für die Resultate der Abhängigkeiten der **Drahtlagenmultiplizität** läßt sich folgendes feststellen:

Man erkennt (vgl. Bild A der Abbildung 6.1) keine Abhängigkeit der Drahtlagenmultiplizität $N_{Tref fer}$ von der Lagenummer.

¹CJCC bezeichnet hier die BOS-Datenbank mit dem Namen CJCC, in der globale Rekonstruktionsparameter des zentralen Spurdetektors gespeichert sind [Blo87].

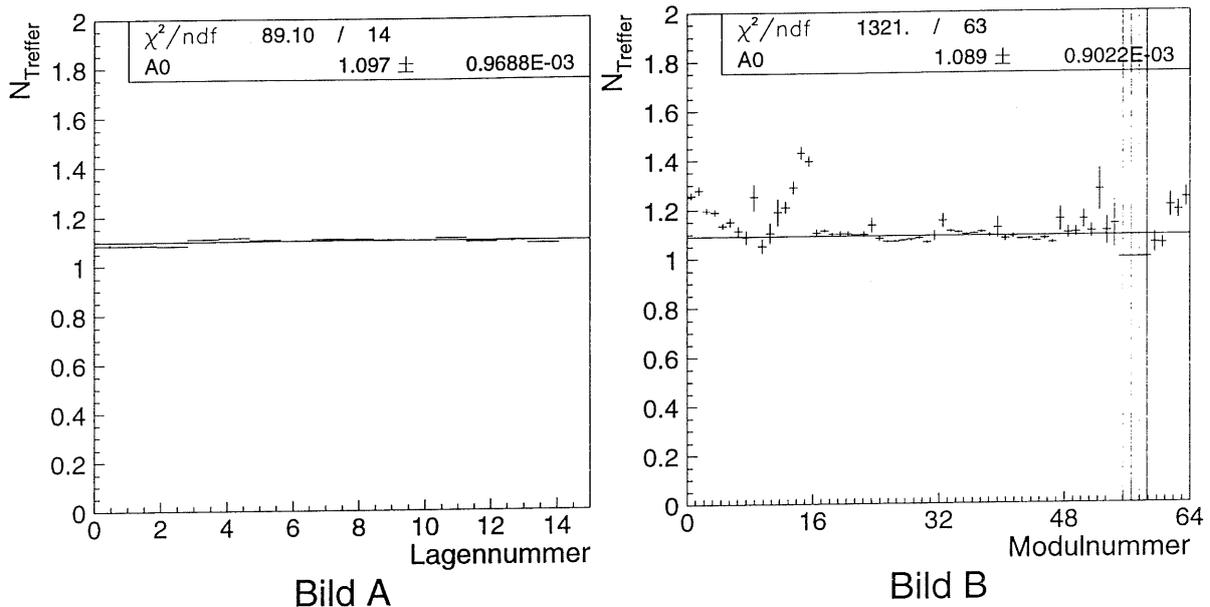


Abbildung 6.1: Lagen- und Modulabhängigkeit der Drahtlagenmultiplizität

Bei Bild B der Abbildung 6.1 ist zu sehen, daß die Drahtlagenmultiplizität $N_{Treffer}$ in den beiden Endkappen von der Modulnummer abhängt. Besonders gut zu sehen ist dieser Effekt in der hinteren Endkappe. In der hinteren Endkappe ist ein Abfall der Multiplizität von Modulnummer 0 bis 7 und ein Anstieg der Multiplizität von Modulnummer 9 bis 15 zu sehen. Die Module mit den Modulnummern 0 bis 7 liegen unterhalb der Strahlachse; die Module 8 und 9 liegen auf der Höhe der Strahlachse und die Module mit den Modulnummern 10 bis 15 liegen oberhalb der Strahlachse.

Die Begründung für diese Modulabhängigkeit liegt in einem geometrischen Effekt: Die Drähte in den Streamerrohrkammern verlaufen in den Endkappen parallel zur x -Achse des H1-Koordinatensystems. Je größer die Steigung senkrecht zu den Drähten $\frac{dy}{dz}$ ist, mit der minimalionisierende Teilchen in die Module der Endkappen einfallen (vgl. Bild B der Abbildung 6.3), desto mehr Drähte einer Lage in einem Endkappenmodul können getroffen werden.

In der vorderen Endkappe ist die Modulabhängigkeit der Drahtlagenmultiplizität zum einen wegen der erheblich geringeren Statistik nicht ebenso ausgeprägt wie in der hinteren Endkappe. Zum anderen — bedingt durch die Lage des $e-p$ -Wechselwirkungspunktes (der näher an der hinteren als an der vorderen Endkappe liegt) — werden bei der vorderen Endkappe nur kleinere Steigungen $\frac{dy}{dz}$ für kosmische Myonen, welche die Vertexregion passiert haben, gemessen. Folglich ist die Abhängigkeit der Multiplizität von der Modulnummer in der vorderen Endkappe nicht so ausgeprägt.

Im Zentralbereich ist diese Modulabhängigkeit ebenfalls angedeutet, erkennbar an einzelnen Modulen, die eine geringfügig höhere Multiplizität aufweisen. Da

die Einfallswinkel von Teilchenspuren kosmischer Myonen in die Zentralbereichsmodule jedoch nicht so große Werte wie in den Endkappen erreichen, ist die Abhängigkeit der Drahtlagenmultiplizität von der Modulnummer im Zentralbereich nicht ebenso ausgeprägt wie in den Endkappen.

Man kann in Abbildung 6.2 keine Abhängigkeit der Drahtlagenmultiplizität $N_{Treffer}$ vom Impuls erkennen, sieht man von den ersten beiden Einträgen in der Abbildung ab.

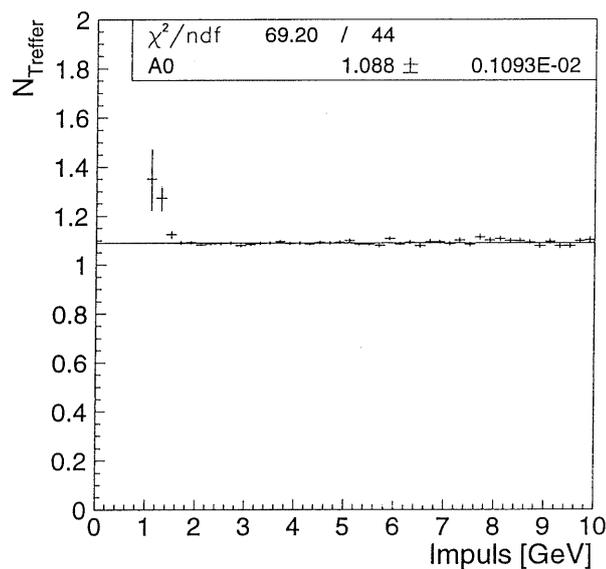


Abbildung 6.2: *Impulsabhängigkeit der Drahtlagenmultiplizität*

Es ist ebenfalls keine Abhängigkeit der Drahtlagenmultiplizität $N_{Treffer}$ von der Steigung *senkrecht zu den Streifen* feststellbar (vgl. Bild A der Abbildung 6.3).

Korreliert mit der Modulabhängigkeit der Drahtlagenmultiplizität (die weiter oben schon erläutert wurde) ist eine Abhängigkeit der Drahtlagenmultiplizität von der Steigung *senkrecht zu den Drähten*. Diese Abhängigkeit zeigt das Bild B der Abbildung 6.3.

Es läßt sich eine mittlere Multiplizität $N_{Treffer}$ von ca. 1,1 getroffenen Drähten pro Ereignis, Modul und Lage erkennen (vgl. die Größe A0 in den Abbildungen 6.1 bis 6.3). Diese von 1 differierende Drahtlagenmultiplizität wurde im voranstehenden Kapitel schon vorhergesagt, was als Folge von

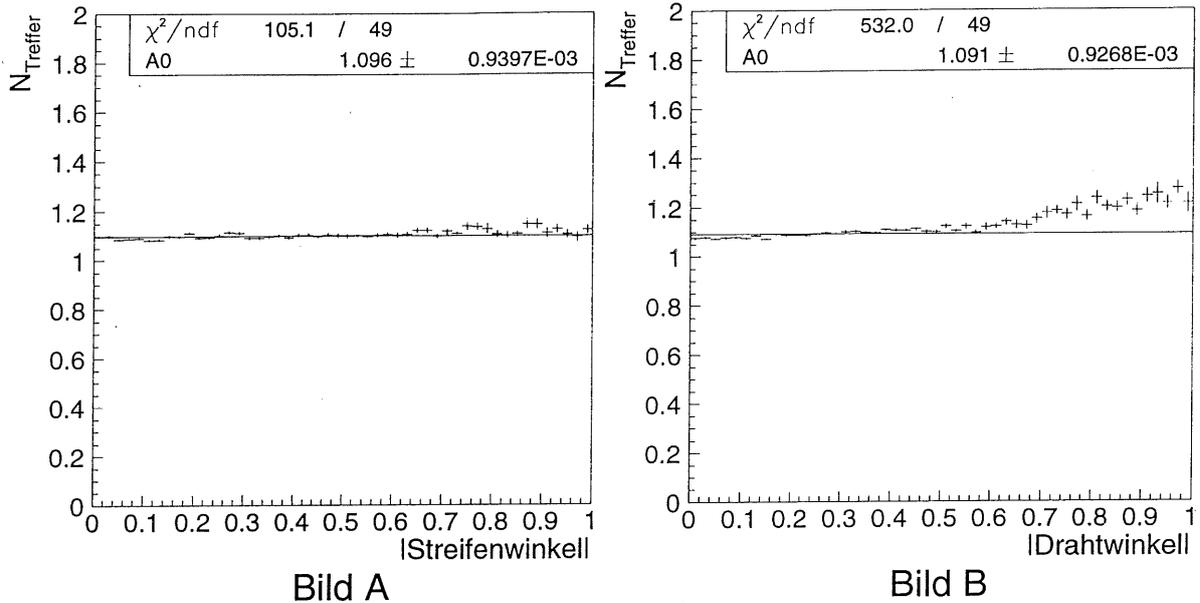


Abbildung 6.3: Abhängigkeit der Drahtlagenmultiplizität von der Steigung senkrecht zu den Streifen (Bild A) und senkrecht zu den Drähten (Bild B)

- Ionisationsvorgängen in den Kunststoffwänden, die die Streamerrohrwände voneinander trennen,
- hochenergetischen Ionisationselektronen und
- elektronischem Übersprechen (Crosstalk) zu betrachten ist.

2. Für die Resultate der Abhängigkeiten der Streifenlagenmultiplizität läßt sich folgendes feststellen:

Man erkennt keine systematische Abhängigkeit der Streifenlagenmultiplizität von der Lagennummer, wie in Bild A der Abbildung 6.4 sichtbar ist, in dem die mittlere Zahl der getroffenen gemeldeten Streifenelektroden $N_{Treffer}$ gegen die Lagennummer aufgetragen ist.

Die Schwankung in der Abhängigkeit der Streifenlagenmultiplizität $N_{Treffer}$ von der Modulnummer in Bild B der Abbildung 6.4 (es ergeben sich Multiplizitätswerte zwischen 1,5 und 2,5) wurde nicht näher untersucht.

Es ist ebenfalls keine Abhängigkeit der Streifenlagenmultiplizität $N_{Treffer}$ vom Impuls zu verzeichnen (vgl. Abbildung 6.5) — sieht man von den ersten Einträgen in der Abbildung ab.

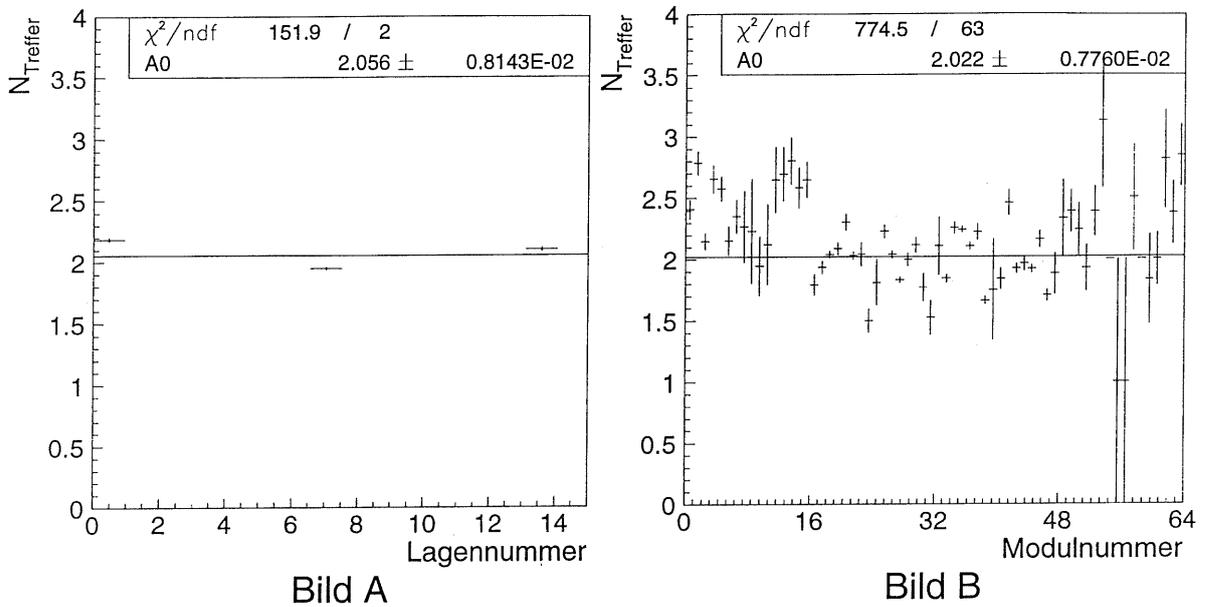


Abbildung 6.4: Abhängigkeit der Streifenlagenmultiplizität von der Lagennummer (Bild A) und von der Modulnummer (Bild B)

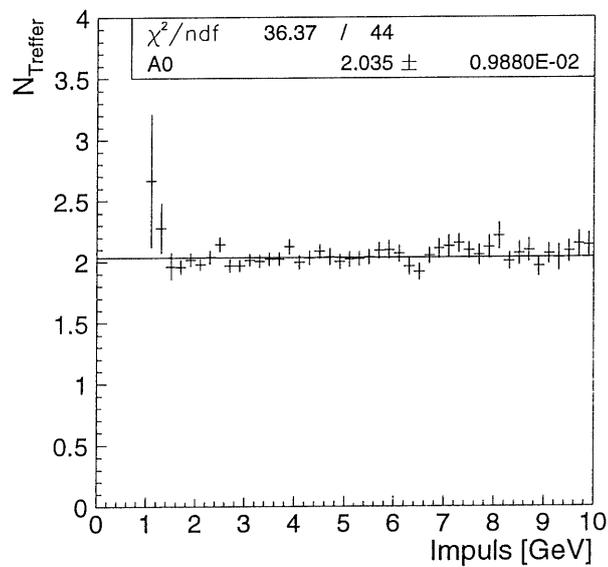


Abbildung 6.5: Impulsabhängigkeit der Streifenlagenmultiplizität

Untersucht man die Einfallswinkelabhängigkeiten der Streifenlagenmultiplizität $N_{Treffer}$ von der Steigung *senkrecht zu den Streifen* („Streifenwinkel“) und *senkrecht zu den Drähten* („Drahtwinkel“, vgl. Abbildung 6.6), so läßt sich keine Abhängigkeit der Streifenlagenmultiplizität von den Einfallswinkeln feststellen.

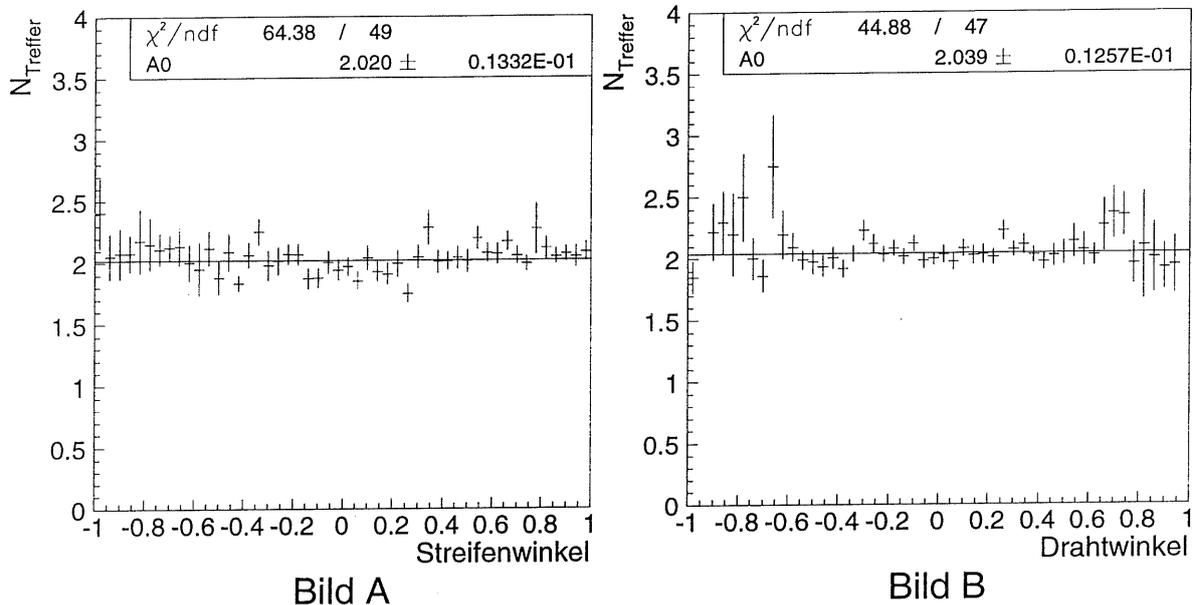


Abbildung 6.6: Winkelabhängigkeit der Streifenlagenmultiplizität

Ein weiteres Ergebnis der Untersuchung der Streifenlagenmultiplizität besteht darin, daß — wie an der Größe A0 in den Abbildungen 6.4 bis 6.6 abzulesen ist — sich die mittlere Zahl $N_{Treffer}$ der als getroffen gemeldeten Streifenelektroden pro Ereignis, Modul und Lage auf ca. 2 beläuft. Diese Zahl kommt durch eine komplexe Abhängigkeit von vielen Parametern zustande. Unter anderem gehen Geometrie und elektrische Eigenschaften der Streifenelektroden, wie Oberflächenwiderstände und Kapazitäten, in diese Abhängigkeit ein.

6.1.2 Nachweiswahrscheinlichkeit für Draht- und Streifenlagen

Bei den Untersuchungen betreffend der Lagennachweiswahrscheinlichkeit von kosmischen Myonen in den Streamerrohrkammern wurden die Abhängigkeiten von:

- der auf die Flugzeit korrigierten Zeit t_0 ,
- der Modulnummer,

- dem Impuls,
- dem Einfallswinkel in die Streamerrohrkammern senkrecht zu den Streifen und
- dem Einfallswinkel in die Streamerrohrkammern senkrecht zu den Drähten

untersucht.

Zu erwähnen ist noch, daß bei den verwendeten Daten die gesamte Streifenlage 0 der hinteren Endkappe nicht verwendet wurde (da diese defekt war), so daß (u.a.) eine geringere Statistik bei den Untersuchungen der Streifenlage 0 in Relation zu den beiden anderen Streifenlagen nicht verwundern sollte.

1. Die **Drahtlagen** zeigen folgende Abhängigkeiten der Nachweiswahrscheinlichkeit:

Eine deutliche Abhängigkeit der Nachweiswahrscheinlichkeit $\varepsilon_{(6+7)}$ der Drahtlagen von dem auf die Flugzeit korrigierten t_0 , also dem Zeitpunkt, an dem das betrachtete Myon den kleinsten Abstand zum $e-p$ -Wechselwirkungspunkt hat, läßt sich in Abbildung 6.7 konstatieren.

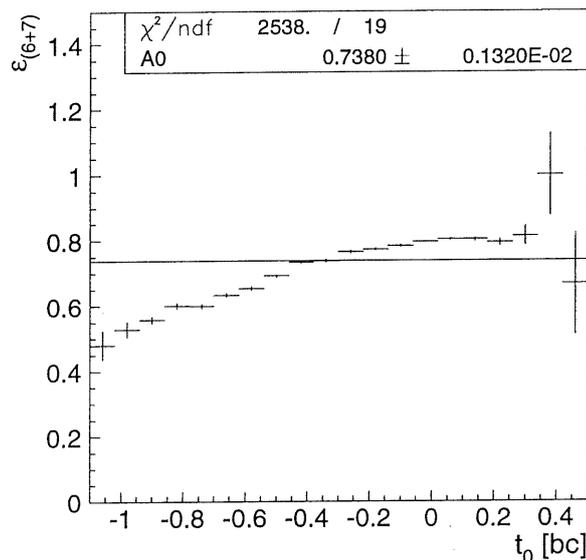


Abbildung 6.7: Zeitabhängigkeit der Nachweiswahrscheinlichkeit der Drahtlagen

Unterscheidet sich der nominelle Zeitpunkt, an dem die Datennahme ausgelöst wird, und der (um die Flugzeit korrigierte) Zeitpunkt t_0 , an dem das betrachtete Myon den kleinsten Abstand zum $e-p$ -Wechselwirkungspunkt hat, um ca. 48 ns (ein halbes *Bunch Crossing*), so befinden sich die getroffen gemeldeten Drähte, die

von dem Myon im instrumentierten Eisen verursacht werden, nicht mehr in der ausgelesenen Zeitscheibe. Deshalb scheinen diese Myonen eine geringere Lagennachweiswahrscheinlichkeit aufzuweisen. Ist diese Zeitdifferenz geringer, werden die durch die Myonen getroffen gemeldeten Drähte auch korrekt ausgelesen, und die Lagennachweiswahrscheinlichkeit steigt an.

Um diese Abhängigkeit bei den folgenden Untersuchungen auszuschließen, wurde in den untenstehenden Abbildungen verlangt, daß der Betrag von t_0 kleiner als $0,2bc$ ($|t_0| < 0,2bc$) betragen soll, um so eine maximale Nachweiswahrscheinlichkeit in Abhängigkeit von t_0 zu gewährleisten — wie man in Abbildung 6.7 ablesen kann.

Als unerwartetes Ergebnis läßt sich eine Abhängigkeit der Nachweiswahrscheinlichkeit für Drahtlagen $\varepsilon_{(6+7)}$ von der Modulnummer konstatieren (vgl. Abbildung 6.8).

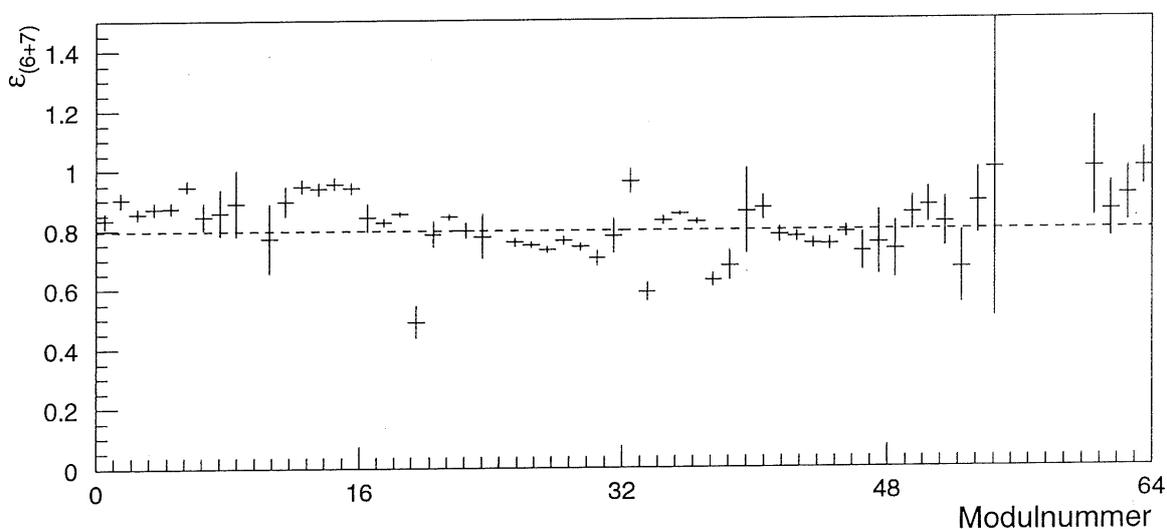


Abbildung 6.8: Modulabhängigkeit der Nachweiswahrscheinlichkeit der Drahtlagen

Besonders deutlich tritt dieser Effekt in den beiden Endkappen auf: Trägt man, getrennt für die vordere und die hintere Endkappe, die Nachweiswahrscheinlichkeit der Drahtlage 6 zusammen mit der Drahtlage 7 $\varepsilon_{(6+7)}$ in je einer Abbildung gegen die Modulnummer auf, so erkennt man einen Anstieg der Lagennachweiswahrscheinlichkeit zu höheren Modulnummern hin (vgl. Bild A und Bild B der Abbildung 6.9).

Für dieses Phänomen gibt es zwei naheliegende Erklärungen: Zum einen könnte der Temperaturgradient vom unteren Teil des Detektors (niedrige Modulnummern in den Endkappen) zu höheren Temperaturen im oberen Teil des Detek-

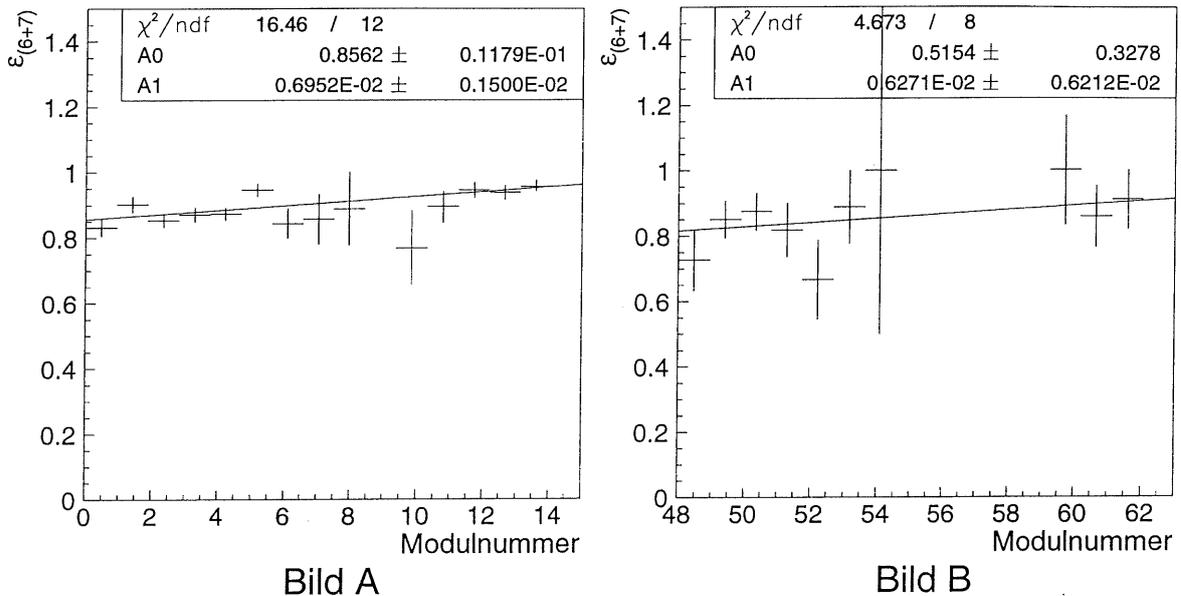


Abbildung 6.9: Modulabhängigkeit der Nachweiswahrscheinlichkeit der Drahtlagen nach hinterer (Bild A) und vorderer (Bild B) Endkappe getrennt

tors (höhere Modulnummern in den Endkappen) für die unterschiedlichen Lagennachweiswahrscheinlichkeiten in den Endkappen des Myonsystems verantwortlich sein, da die Lagennachweiswahrscheinlichkeit bei höheren Temperaturen ebenfalls größere Werte erreicht. Zum anderen wäre auch die mindere Gasqualität im unteren Teil des Detektors eine potentielle Erklärung, da die Zufuhr von Frischgas von den oberen Endkappenmodulen erfolgt und das Gas der Streamerrohrkammern von den unteren Modulen in den Endkappen abgeführt wird.

Um zu überprüfen, worin die richtige Erklärung für die Modulabhängigkeit der Lagennachweiswahrscheinlichkeit zu finden ist, wurden die Module des Zentralbereichs untersucht, die, da die Streamerrohrkammern dieser Module auf einer Höhe liegen, unabhängig von dem Temperaturgradienten sein sollten.

Für die Zentralbereichsmodule 35 und 36, bei denen die Drahtlagen 6 und 7 an einer gemeinsamen Gasversorgung hängen und *nacheinander* mit Gas versorgt werden, wurde ermittelt, daß die Drahtlage 7 im Mittel eine höhere Lagennachweiswahrscheinlichkeit $\varepsilon_{(7)}$ aufweist als die Drahtlage 6 $\varepsilon_{(6)}$ (vgl. Abbildungen 6.10 und 6.11).

Das Phänomen, daß die Drahtlage 7 eine höhere Nachweiswahrscheinlichkeit aufweist als die Drahtlage 6, sowohl im Zentralbereichsmodul 35 als auch im Zentralbereichsmodul 36, wäre damit erklärbar, daß die Drahtlage 7 eine höhere Gasqualität aufweist als die Drahtlage 6; also daß die Drahtlage 7 *zuerst* mit Frischgas versorgt wird. Dies läßt sich aber aus technischen Gründen nicht verifizieren.

Desweiteren ist in Abbildung 6.8 eine höhere Nachweiswahrscheinlichkeit in den beiden Endkappen, im Vergleich zu den Zentralbereichsmodulen, zu konstatieren.

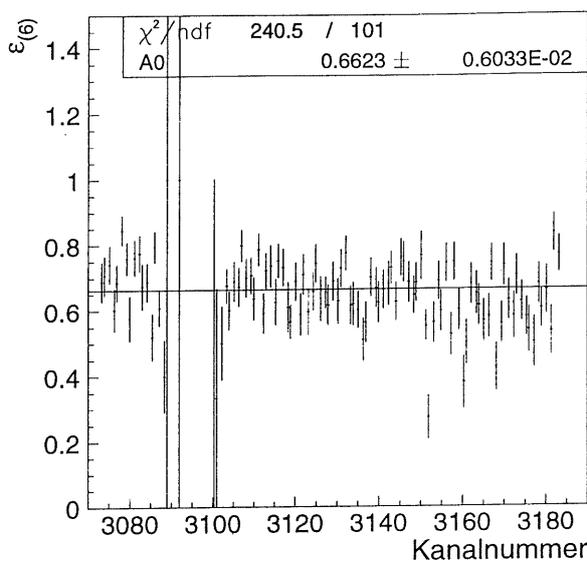


Bild A

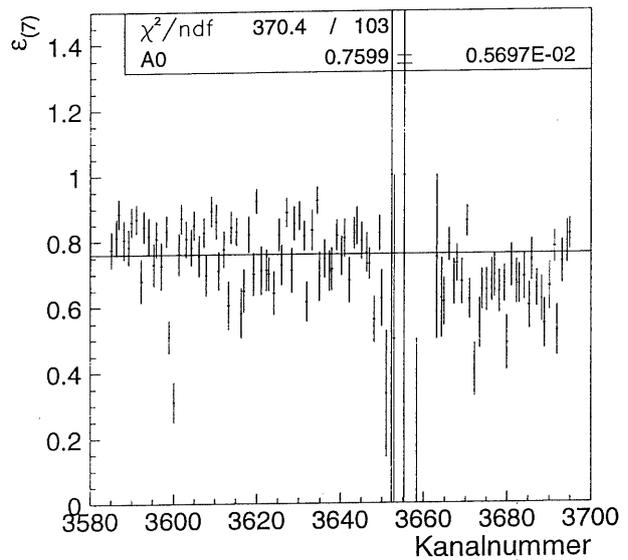


Bild B

Abbildung 6.10: Abhängigkeit der Lagennachweiswahrscheinlichkeit von der Kanalnummer bei Modul 35 für die Drahtlage 6 (Bild A) und für die Drahtlage 7 (Bild B) — mit Schnitt in t_0

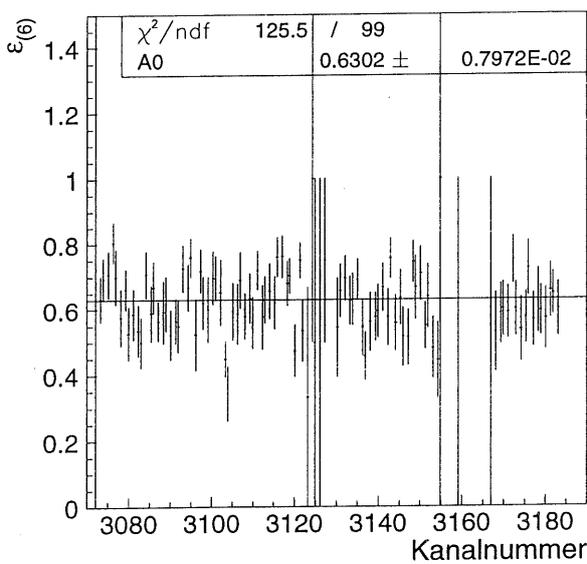


Bild A

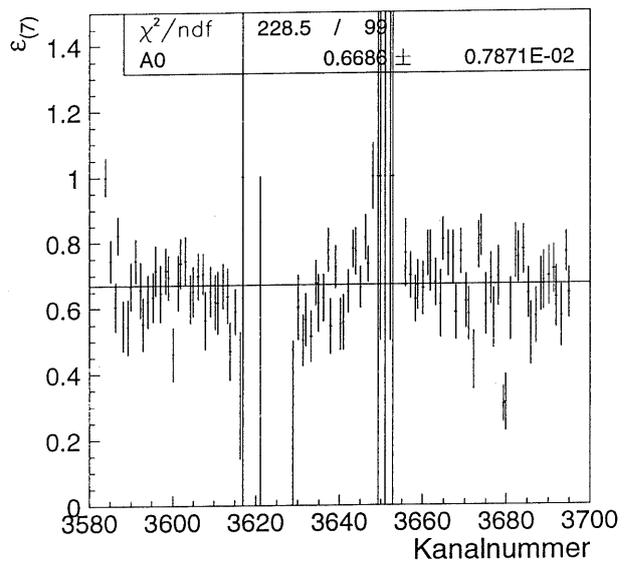


Bild B

Abbildung 6.11: Abhängigkeit der Nachweiswahrscheinlichkeit von der Kanalnummer bei Modul 36 für die Drahtlage 6 (Bild A) und für die Drahtlage 7 (Bild B) — mit Schnitt in t_0

Wie erwartet, erkennt man keine Abhängigkeit der Nachweiswahrscheinlichkeit der Drahtlagen $\varepsilon_{(6+7)}$ von den Impulsen minimalionisierender Teilchen (bei Impulsen, die kleiner als 10 GeV sind — vgl. Abbildung 6.12).

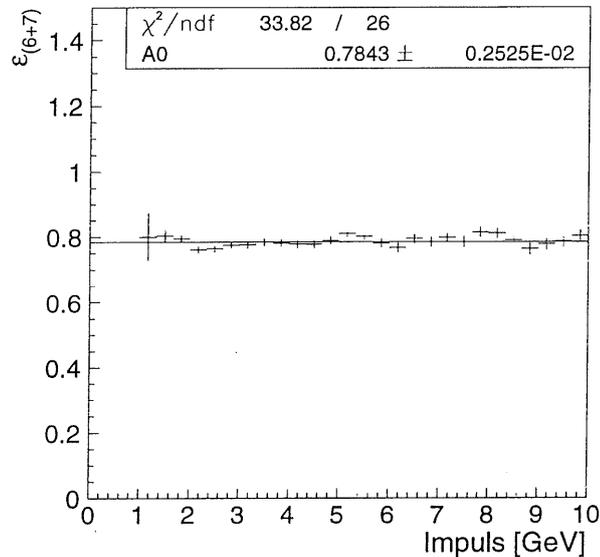


Abbildung 6.12: *Impulsabhängigkeit der Nachweiswahrscheinlichkeit von Drahtlagen*

Faßt man die Abbildungen, in denen die Abhängigkeit der Lagennachweiswahrscheinlichkeit $\varepsilon_{(6+7)}$ von der Steigung *senkrecht zu den Streifen* (dem „Streifenwinkel“: im Zentralbereich $\cotan(\theta)$, in den Endkappen die Steigung $\frac{dx}{dz}$) dargestellt ist, für die Drahtlagen 6 und 7 zusammen (vgl. Bild A der Abbildung 6.13), so sieht man, daß sich nahezu eine konstante Verteilung für diese Abhängigkeit von dem „Streifenwinkel“ ergibt.

Der im voranstehenden Kapitel beschriebene Effekt, daß die Lagennachweiswahrscheinlichkeit mit größer werdendem Winkel *senkrecht zu den Streifen* ebenfalls ansteigt, da dann mehr Streamerzellen in der Streamerrohrkammer gebildet werden können, ist also *nicht* zu verifizieren. Im Gegenteil: man muß die Vorstellung der Funktionsweise der Streamerrohrkammern dahingehend korrigieren, daß die Lagennachweiswahrscheinlichkeit offensichtlich unabhängig von der Anzahl der Streamerzellen ist, die in eine Streamerrohrkammer beim Durchgang eines minimalionisierenden Teilchens gelegt werden können.

Faßt man die Abbildungen, in denen die Abhängigkeit der Lagennachweiswahrscheinlichkeit $\varepsilon_{(6+7)}$ von der Steigung *senkrecht zu den Drähten* (dem „Drahtwinkel“: im Zentralbereich $\tan(\phi)$, in den Endkappen die Steigung $\frac{dy}{dz}$) dargestellt ist, für die Drahtlagen 6 und 7 zusammen (vgl. Bild B der Abbildung 6.13), so

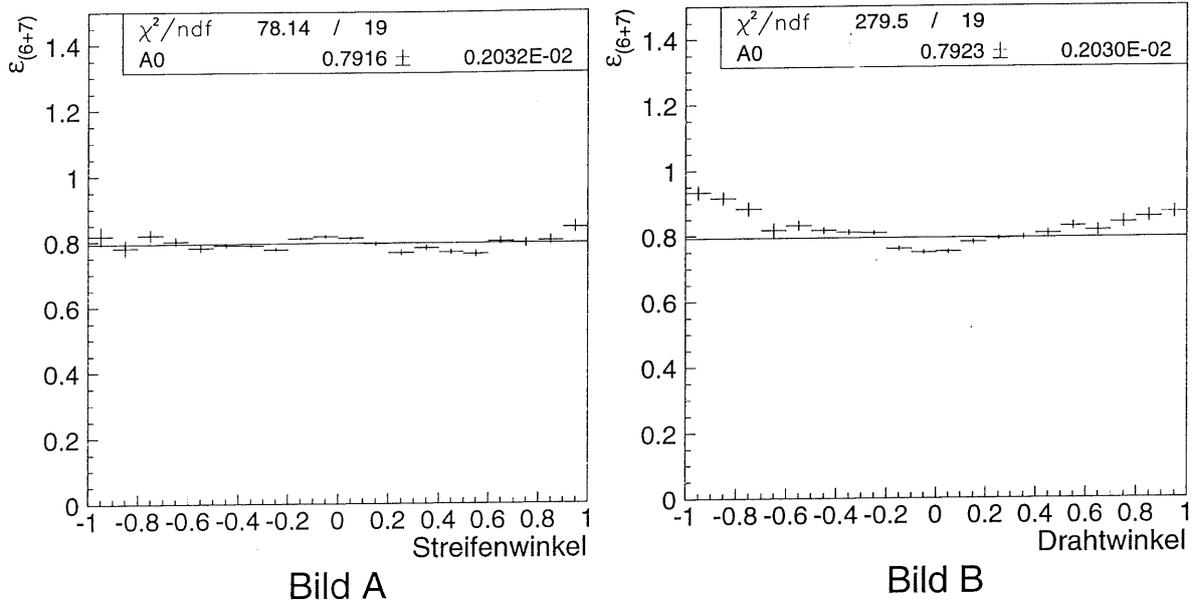


Abbildung 6.13: Abhängigkeit der Nachweiswahrscheinlichkeit für Drahtlagen von der Steigung senkrecht zu den Streifen (Bild A) und von der Steigung senkrecht zu den Drähten (Bild B)

erkennt man eine Abhängigkeit bei einem nahezu senkrechten Einfall eines Myons in die Streamerrohrkammern und für größer werdende Einfallswinkel: mit ansteigendem Einfallswinkel nimmt die Nachweiswahrscheinlichkeit der Drahtlagen 6 und 7 $\varepsilon_{(6+7)}$ kontinuierlich zu.

Für die Steigung *senkrecht zu den Drähten* kann man demnach die physikalische Vorstellung verifizieren, daß sowohl die Ineffizienzen, die durch die Streamerrohrwände verursacht werden, als auch die minimale Spurlänge im aktiven Volumen einer Streamerröhre, Einfluß auf die Nachweiswahrscheinlichkeit der Drahtlagen ausüben (vgl. Kapitel 5.3).

Die mittlere Nachweiswahrscheinlichkeit $\varepsilon_{(6+7)}$ der Drahtlagen beträgt (wie aus den Abbildungen 6.8, 6.12 und 6.13 ersichtlich ist) ca. 80 %.

2. Die **Streifenlagen** zeigen folgende Abhängigkeiten der Nachweiswahrscheinlichkeit:

Anders als bei den Drahtlagen zeigt sich bei den Streifenlagen, in Abbildung 6.14 dargestellt, keine deutliche Abhängigkeit der Nachweiswahrscheinlichkeit der Streifenlagen von der Zeit t_0 (exemplarisch ist die Abhängigkeit der Nachweiswahrscheinlichkeit der Streifenlage 7 $\varepsilon_{(7)}$ dargestellt). Dieses Ergebnis wird er-

wartet, da bei der Bestimmung der Nachweiswahrscheinlichkeit der Streifenlage gefordert wurde, daß die zugehörige Drahtlage getroffen gemeldet wurde.

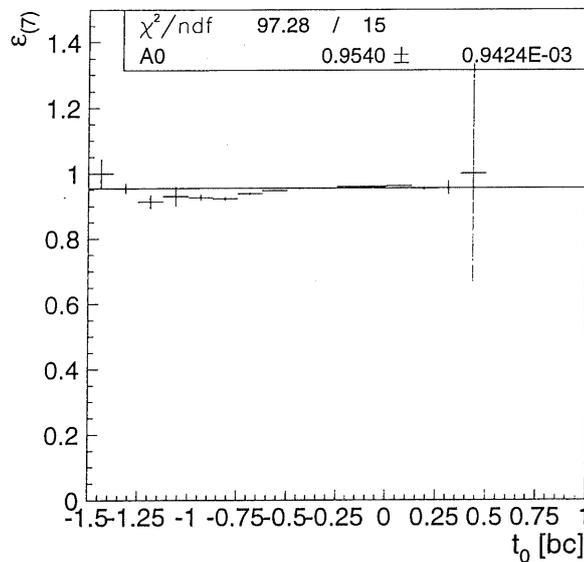


Abbildung 6.14: Zeitabhängigkeit der Nachweiswahrscheinlichkeit der Streifenlage 7

In gewisser Weise kann man auch bei den Streifenlagen, wie bei den Drahtlagen, von einer Abhängigkeit der Nachweiswahrscheinlichkeit $\varepsilon_{(0+7+14)}$ von den Modulen sprechen, da (wie man an den Abbildungen 6.15 und 6.16 erkennen kann) einige Module der Streifenlagen eine erheblich geringere Nachweiswahrscheinlichkeit aufweisen als der Durchschnitt.

Für die Streifenlage 0 bei Modul 29 konnte herausgefunden werden, womit die erheblich geringere Nachweiswahrscheinlichkeit zu begründen ist:

In der Streifenlage 0 sorgen die Auslesebusse (siehe auch Kapitel 4.6) mit den Nummern 16 und 17 für den Transport der Signale an das digitale Schieberegister. Bei der Untersuchung des Moduls 29 der Streifenlage 0, bei dem eine auffallend geringe mittlere Nachweiswahrscheinlichkeit vorliegt (vgl. Abbildung 6.15), wurde herausgefunden, daß der Auslesebus 16 überhaupt keine Streifenelektroden getroffen meldet, also offensichtlich „tot“ ist.

Korrigiert man auf den „toten“ Auslesebus mit der Nummer 16 in der Streifenlage 0 bei Modul 29, so steigt die Nachweiswahrscheinlichkeit für Modul 29 auf ca. 98 % an.

Wie in der Abbildung 6.17 zu erkennen ist, läßt sich keine Abhängigkeit der Nachweiswahrscheinlichkeit der Streifenlagen vom Impuls (für Impulse kleiner

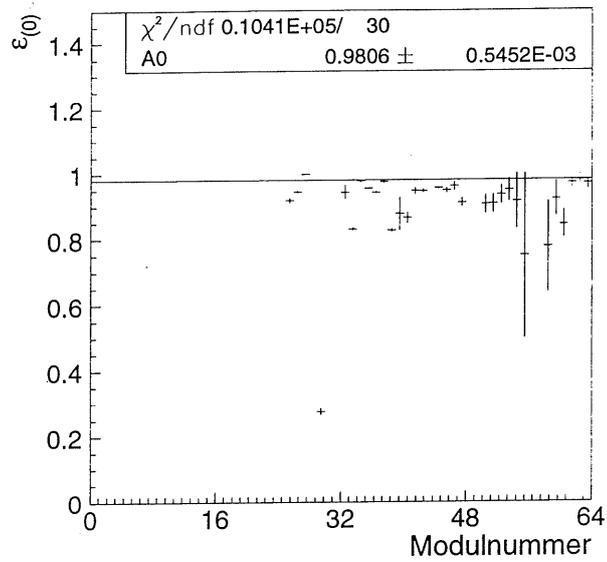


Abbildung 6.15: Modulabhängigkeit der Nachweiswahrscheinlichkeit der Streifenlage 0

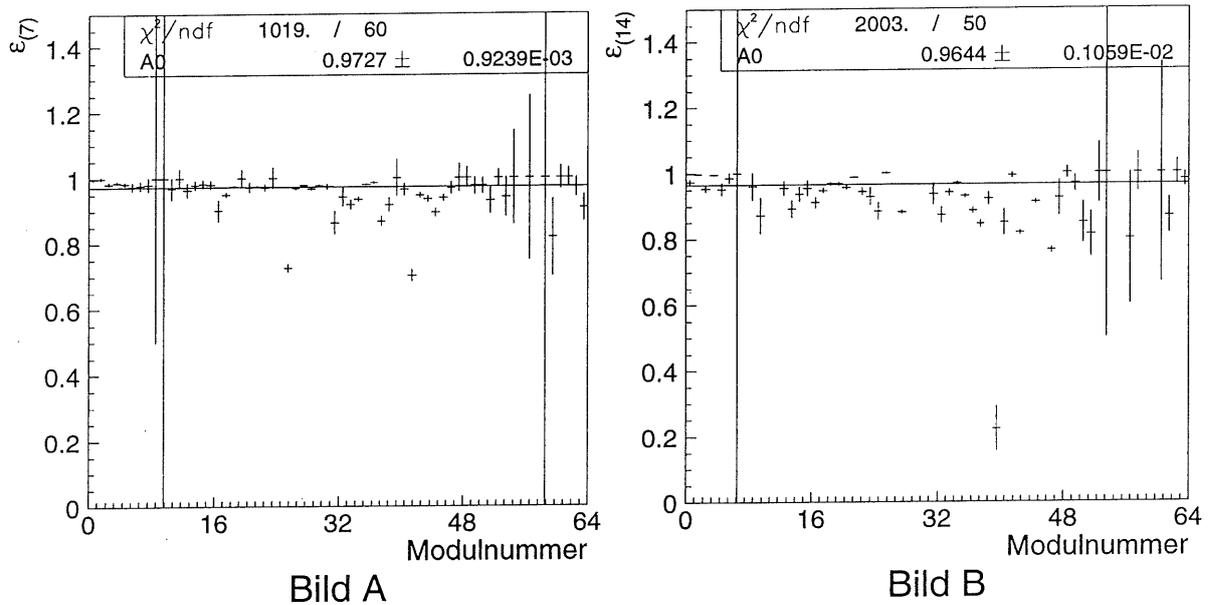


Abbildung 6.16: Modulabhängigkeit der Nachweiswahrscheinlichkeit der Streifenlage 7 und der Streifenlage 14

10 GeV) erkennen; exemplarisch ist die Nachweiswahrscheinlichkeit der Streifenlage 7 $\varepsilon_{(7)}$ dargestellt.

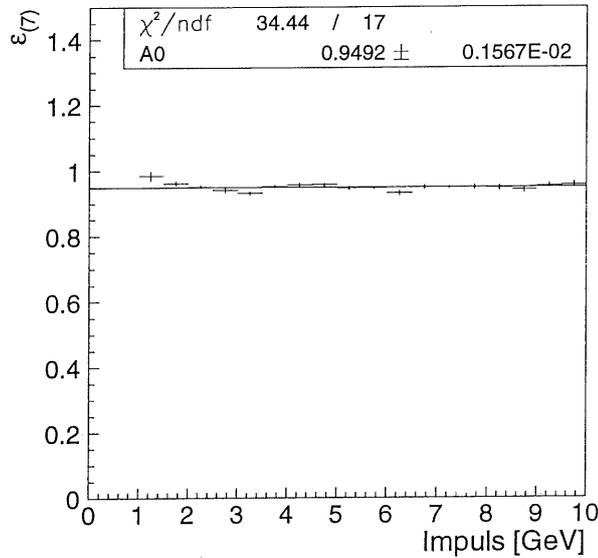


Abbildung 6.17: Impulsabhängigkeit der Nachweiswahrscheinlichkeit bei der Streifenlage 7

Mit Ausnahme der Abhängigkeit der Streifenlage 0 von der Steigung *senkrecht zu den Streifen* bei den Zentralbereichsmodulen ($\cotan(\theta)$, vgl. auch Bild A der Abbildung 6.21) läßt sich bei den Streifenlagen keine Abhängigkeit der Nachweiswahrscheinlichkeit $\varepsilon_{(0+7+14)}$ von den Einfallswinkeln — sowohl *senkrecht zu den Streifen* („Streifenwinkel“) als auch *senkrecht zu den Drähten* („Drahtwinkel“) — in die Streamerrohrkammern erkennen (vgl. Abbildungen 6.18 und 6.19).

Für die Steigung *senkrecht zu den Drähten* ist eine niedrigere mittlere Nachweiswahrscheinlichkeit der Zentralbereichsmodule, im Vergleich zu den Endkappenmodulen, zu registrieren (vgl. Bild A und Bild B der Abbildung 6.19).

Der unerwartete asymmetrische Anstieg der Nachweiswahrscheinlichkeit der Streifenlage 0 $\varepsilon_{(0)}$ mit dem Winkel θ bei den Zentralbereichsmodulen (vgl. Bild A der Abbildung 6.21, in dem die Abhängigkeit der Nachweiswahrscheinlichkeit $\varepsilon_{(0)}$ von $\cotan(\theta)$ aufgetragen ist) ist wie folgt zu erklären:

Die Streifenlage 0 erstreckt sich im Zentralbereich über die gesamte Länge des zentralen Myondetektors. Der Transport der Signale erfolgt aber über zwei getrennte Auslesebusse (siehe auch Kapitel 4.6): über den Auslesebus mit der Nummer 16 und den mit der Nummer 17. Der Auslesebus mit der Nummer 16 transportiert dabei die Signale des vorderen Zentralbereichs zu dem digitalen Schieberegister; der Auslesebus mit der Nummer 17 die Signale des hinteren Zentralbereichs.

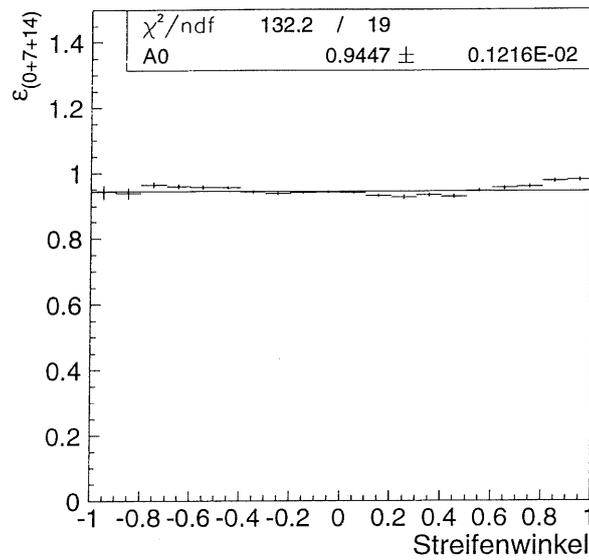


Abbildung 6.18: Abhängigkeit der Nachweiswahrscheinlichkeit der Streifenlagen von der Steigung senkrecht zu den Streifen

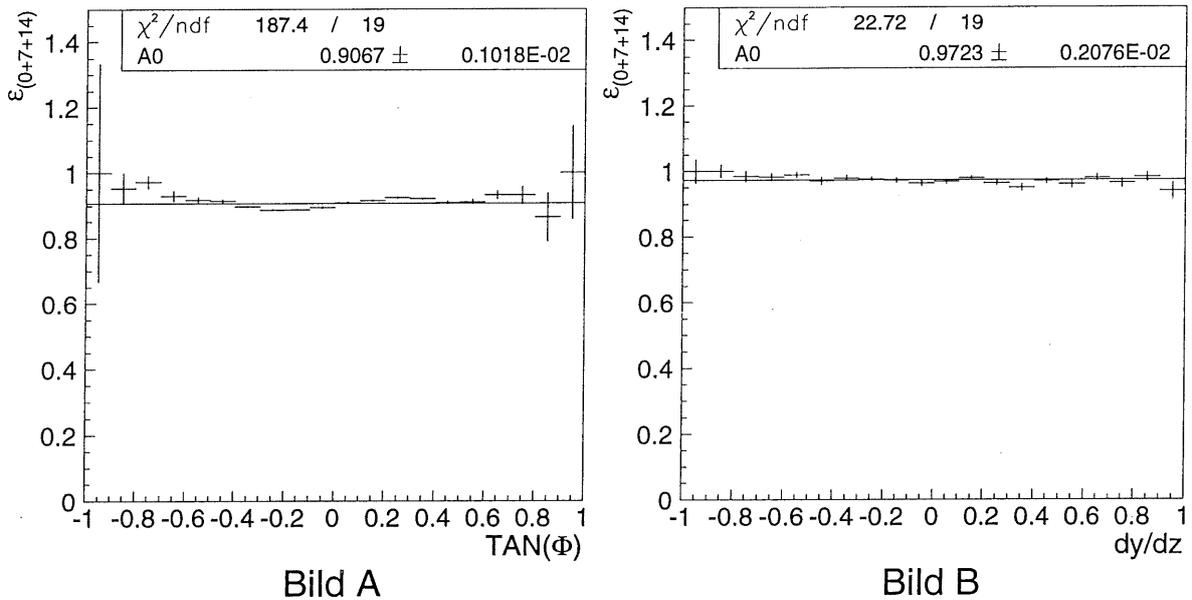


Abbildung 6.19: Abhängigkeit der Nachweiswahrscheinlichkeit der Streifenlagen von der Steigung senkrecht zu den Drähten, getrennt für den Zentralbereich (Bild A) und für die Endkappen (Bild B)

Bei näherer Untersuchung der Nachweiswahrscheinlichkeit der Streifenlage 0 $\varepsilon_{(0)}$ von der Modulnummer *getrennt* für beide Auslesebusse zeigt sich (wie man in Bild A und in Bild B der Abbildung 6.20 erkennen kann), daß die Lagennachweiswahrscheinlichkeit für den Auslesebus mit der Nummer 17 erheblich geringer ist als für den Auslesebus mit der Nummer 16².

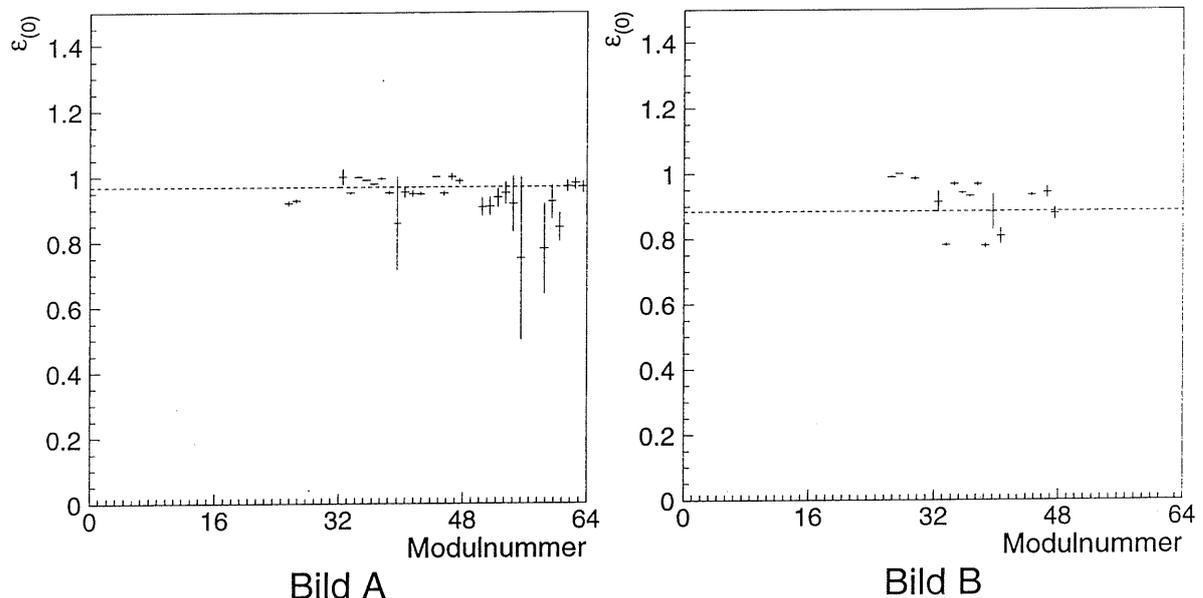


Abbildung 6.20: Abhängigkeit der Nachweiswahrscheinlichkeit der Streifenlage 0 von der Modulnummer für den Auslesebus 16 (Bild A) und den Auslesebus 17 (Bild B)

Korrigiert man die Lagennachweiswahrscheinlichkeit für den Auslesebus 17 dahingehend, daß man die wesentlich schlechteren Module 33, 38 und 40 aus den Untersuchungen ausklammert, dann gleichen sich die Lagennachweiswahrscheinlichkeiten für die Auslesebusse 16 und 17 an, da die Module mit der erheblich geringeren mittleren Nachweiswahrscheinlichkeit bei der Untersuchung des Auslesebusses mit der Nummer 17 in die Betrachtungen nicht einbezogen wurden.

Untersucht man nun wieder die Abhängigkeit der Nachweiswahrscheinlichkeit der Streifenlage 0 $\varepsilon_{(0)}$ von dem Einfallswinkel θ in die Zentralbereichsmodule, ohne die Module 33, 38 und 40 des Auslesebusses 17 zu berücksichtigen (dargestellt in Bild B der Abbildung 6.21 im Vergleich zu Bild A, in dem die Korrekturen nicht vorgenommen wurden), dann erkennt man eine erheblich geringere Abhängigkeit der Nachweiswahrscheinlichkeit der Streifenlage 0 $\varepsilon_{(0)}$ von dem Einfallswinkel θ .

Es ist also klar, daß der asymmetrische Anstieg der Nachweiswahrscheinlichkeit der Streifenlage 0 von dem Einfallswinkel θ durch die geringere mittlere Nach-

²Die hier untersuchten Auslesebusse mit den Nummern 16 und 17 sind *nicht* identisch mit den Auslesebussen, die weiter oben bei der Untersuchung der Nachweiswahrscheinlichkeit der Streifenlage 0 bei Modul 29 betrachtet wurden.

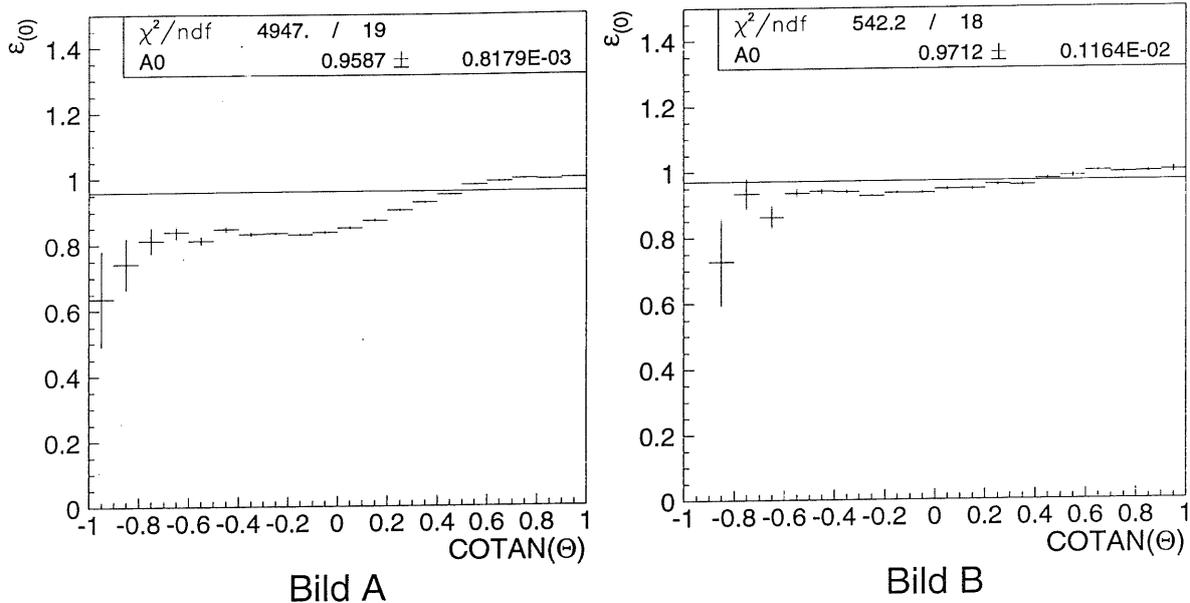


Abbildung 6.21: Nachweiswahrscheinlichkeit der Streifenlage 0 in Abhängigkeit von $\cotan(\theta)$ — in Bild A ohne, in Bild B mit Korrekturen

weiswahrscheinlichkeit einiger Module des Auslesebusses 17 hervorgerufen wird, der nur die Signale des hinteren Zentralbereichs transportiert.

Die Untersuchungen bei anderen Modulen (sowohl bei Draht- als auch bei Streifenlagen — abgesehen von Modul 29 der Streifenlage 0) mit *erheblich geringerer Nachweiswahrscheinlichkeit* verliefen weitgehend ergebnislos.

So wurde untersucht, ob die betrachteten Module eventuell zur falschen Zeit t_0 ausgelesen wurden, also das Maximum von t_0 zeitlich verschoben war.

Dazu wurde die Nachweiswahrscheinlichkeit von Draht- bzw. Streifenlagen bei Modulen mit erheblich geringerer Nachweiswahrscheinlichkeit gegen die Zeit t_0 graphisch dargestellt, um herauszufinden, ob das Maximum dieser Abhängigkeit zeitlich verschoben ist, und ob wegen der Beschränkung auf das Zeitintervall $\pm 0,2 \text{ bc}$ eine geringere mittlere Lagennachweiswahrscheinlichkeit für diese Module ermittelt wird.

Exemplarisch ist die Abhängigkeit der Nachweiswahrscheinlichkeit von der Streifenlage 7 und Modul 25 $\varepsilon_{(7)}$ in der Abbildung 6.22 dargestellt (bei der zu beobachten ist, daß dieses Modul eine erheblich geringere Lagennachweiswahrscheinlichkeit aufweist als andere Module, vgl. Bild A der Abbildung 6.16). Es ist keine *Verschiebung* der Lagennachweiswahrscheinlichkeit mit t_0 zu sehen, sondern vielmehr eine allgemein zu *niedrige* Lagennachweiswahrscheinlichkeit zu verzeichnen.

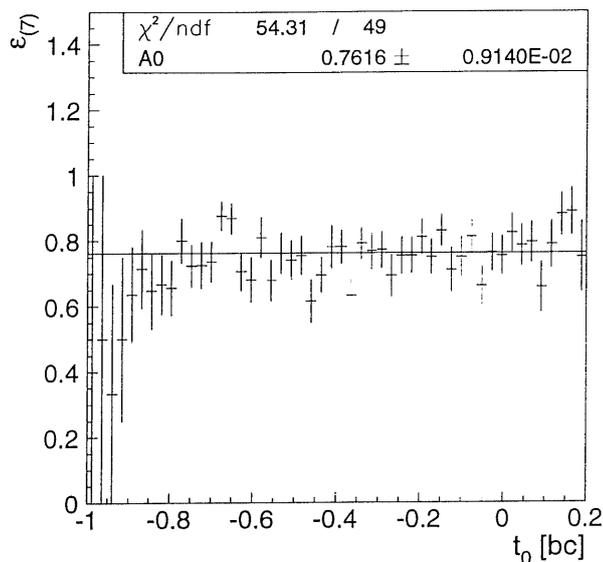


Abbildung 6.22: Abhängigkeit der Nachweiswahrscheinlichkeit der Streifenlage 7 von t_0 bei Modul 25

Es wurde zudem analysiert, ob Drähte/Streifen der betrachteten Module unerkant keine Signale abgaben, folglich als „tot“ deklariert werden müssen.

Dazu wurden alle Kanalnummern der Drähte/Streifen von Modulen mit erheblich geringerer Nachweiswahrscheinlichkeit ermittelt. Daraufhin wurde die Abhängigkeit der Lagennachweiswahrscheinlichkeit von diesen Kanalnummern untersucht, um herauszufinden, ob bei einzelnen Drähten/Streifen die Lagennachweiswahrscheinlichkeit null ist, diese Kanäle also „tot“ sind.

Exemplarisch ist wieder die Nachweiswahrscheinlichkeit der Streifenlage 7 in Modul 25 $\varepsilon_{(7)}$ in der Abbildung 6.23 untersucht worden. Diese Abbildung zeigt, daß *kein* Streifen dieser Lage die Lagennachweiswahrscheinlichkeit null hat, sondern vielmehr, daß die mittlere Lagennachweiswahrscheinlichkeit $\varepsilon_{(7)}$ in Abhängigkeit von den Kanalnummern der Streifenlage 7 in Modul 25 insgesamt zu niedrig ist (ca. 76 %, wie die Größe A0 beweist).

Zuletzt wurde überprüft, ob die Schwellen für die Auslesebusse der *Drahtlagen* falsch eingestellt waren, so daß — bedingt durch zu hohe Schwellen — weniger Signale weitergeleitet wurden.

Für die Untersuchung der Schwellen wird angenommen, daß die Streifenlagenmultiplizität $N_{Treffer}$ mit der Signalthöhe der Drahtlagen korreliert ist: Je größer das Signal der Drahtlagen ist, desto mehr Streifenlagen werden getroffen gemeldet.

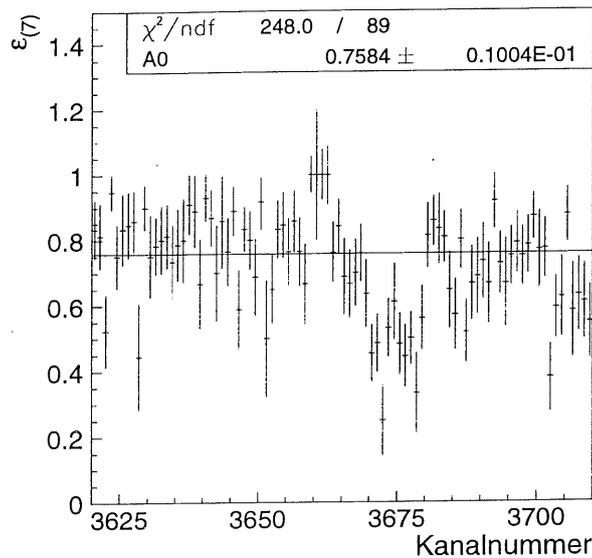


Abbildung 6.23: Abhängigkeit der Nachweiswahrscheinlichkeit der Streifenlage 7 von den einzelnen Kanalnummern bei Modul 25

Um zu überprüfen, ob die Schwellen für die Auslesebusse der Drahtlagen falsch eingestellt waren, untersucht man die Abhängigkeit der mittleren Nachweiswahrscheinlichkeit der Drahtlagen von der Streifenlagenmultiplizität. Dabei geht man davon aus, daß die Signalgrößen der Drahtlagen nicht konstant sind, sondern einer Schwankung unterliegen: Die Signalgrößen der Drahtlagen werden vor allem durch eine Landau-Fluktuation hervorgerufen, also durch eine statistisch bedingte Schwankung. Desweiteren ist die Größe der Drahtlagensignale mit der Spurlänge der ionisierenden Teilchen im aktiven Volumen der Streamerrohrzelle korreliert.

Anders als bisher wurde für diese Untersuchungen die Nachweiswahrscheinlichkeit der Drahtlagen in Abhängigkeit von der Streifenlagenmultiplizität bestimmt. Es wurde ermittelt, ob eine Streifenlage ein minimalionisierendes Teilchen registriert hat, und wie viele Streifenelektroden in dieser Streifenlage getroffen gemeldet wurden. Anschließend wurde überprüft, ob ebenfalls die zugehörige Drahtlage, die ein Signal bei der betrachteten Streifenlage induziert, den Durchgang eines Teilchens registriert hat. Aus diesen Angaben wurde die Lagennachweiswahrscheinlichkeit berechnet.

Da die Nachweiswahrscheinlichkeit der Drahtlagen und die Streifenlagenmultiplizität keine unabhängigen Größen sind — anders als dies bisher bei der Bestimmung der Nachweiswahrscheinlichkeit verlangt wurde, da bislang die Lagennachweiswahrscheinlichkeit mit der Methode aus Kapitel 5.5.3 bestimmt wurde — sollte eine Nachweiswahrscheinlichkeit der Drahtlagen, die deutlich über den bisher ermittelten Werten liegt, nicht verwundern.

Untersucht man die Abhängigkeit der mittleren Nachweiswahrscheinlichkeit der Drahtlagen von der Streifenlagenmultiplizität, dann müßte (nach obiger Voraussetzung)

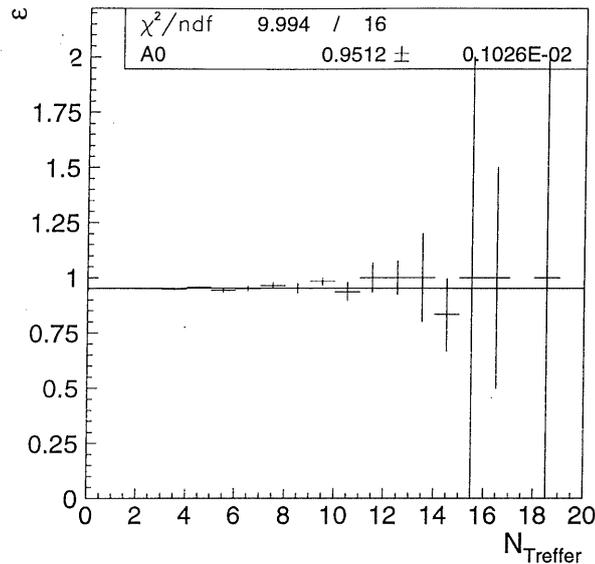


Abbildung 6.24: Abhängigkeit der Nachweiswahrscheinlichkeit der Drahtlagen von der Streifenlagenmultiplizität

ein Anstieg der mittleren Lagennachweiswahrscheinlichkeit zu höheren Multiplizitäten gleichbedeutend mit zu hoch eingestellten Schwellen sein.

Allerdings kann man keine Abhängigkeit der Nachweiswahrscheinlichkeit ϵ der Drahtlagen von der Streifenlagenmultiplizität $N_{Treffer}$ in der Abbildung 6.24 erkennen. Demnach erweist sich die Hypothese, daß die Schwellen für die Auslesebusse der Drahtlagen zu hoch eingestellt sind, ebenfalls als inkorrekt.

Die mittlere Nachweiswahrscheinlichkeit der Streifenlagen beträgt — bestimmt man die Nachweiswahrscheinlichkeit der Streifenlagen mit der Methode aus Kapitel 5.5.3 — (wie aus den Abbildungen 6.14 bis 6.19 ersichtlich ist) nahezu 100 %.

6.2 Lagennachweiswahrscheinlichkeit für Strahl-Halo-Myonen

Bei den Untersuchungen mit Strahl-Halo-Myonen wurden Myonen einer speziellen Dateneinheit verwendet, für die eine zu der Zeit t_0 aus der CJCC-Datenbank (die für Strahl-Halo-Myonen nicht ermittelt werden kann) vergleichbare Zeit errechnet wurde; also eine Zeit, zu der das betrachtete Strahl-Halo-Myon den kleinsten Abstand

zum $e-p$ -Wechselwirkungspunkt hat. Diese Zeit wurde bei dieser Datennahmeeinheit mit dem Myonspektrometer im Vorwärtsbereich bestimmt.

Strahl-Halo-Myonen entstehen nicht durch eine Wechselwirkung in der Vertexregion, sondern treten immer zuerst durch die hintere Endkappe in den H1-Detektor ein und verlaufen parallel zur Strahlachse. Für die Spuren von Strahl-Halo-Myonen, die sich parallel zur Strahlachse erstrecken, muß der Zeitpunkt t_0 , an dem das betrachtete Myon den kleinsten Abstand zum $e-p$ -Wechselwirkungspunkt hat, wie folgt mit der Flugzeit t_{flight} korrigiert werden³:

$$t_0 = \tilde{t}_0 - t_{flight} = \tilde{t}_0 - \frac{(z - \sqrt{x^2 + y^2 + z^2})}{2880,0 \frac{cm}{bc}}, \quad (6.2)$$

wobei x , y und z die Koordinaten der Myonspur im instrumentierten Eisen sind und \tilde{t}_0 die Zeit ist, die — vergleichbar mit $t_{0(CJCC)}$ — für die Strahl-Halo-Myonen als Zeitpunkt, an dem das betrachtete Myon den kleinsten Abstand zum $e-p$ -Wechselwirkungspunkt hat, bestimmt wurde. $2880,0 \frac{cm}{bc}$ entspricht der Vakuumlichtgeschwindigkeit.

Bei den Untersuchungen betreffend der Lagennachweiswahrscheinlichkeit von Strahl-Halo-Myonen in den Streamerrohrkammern wurden die Abhängigkeiten von:

- der auf die Flugzeit korrigierten Zeit t_0 und
- der Modulnummer

untersucht.

1. Für die Resultate der Abhängigkeit der **Nachweiswahrscheinlichkeit der Drahtlagen** läßt sich folgendes feststellen:

Wie im vorigen Kapitel schon erwähnt, können Strahl-Halo-Myonen nur zur Untersuchung der Endkappen verwendet werden, da keine getroffen gemeldeten Drähte in den Zentralbereichsmodulen zu verzeichnen sind (vgl. Abbildung 6.28, in der die Abhängigkeit der Lagennachweiswahrscheinlichkeit $\varepsilon_{(6+7)}$ von der Modulnummer dargestellt ist).

Des weiteren decken Strahl-Halo-Myonen einen sehr eingeschränkten Winkelbereich ab, wie in Bild A der Abbildung 6.25, in dem die Anzahl der Einträge für die Steigung $\frac{dx}{dz}$ in die Endkappen dargestellt ist, und in Bild B der Abbildung 6.25, in dem die Anzahl der Einträge für die Steigung $\frac{dy}{dz}$ in die Endkappen dargestellt ist, abzulesen ist.

Dadurch bedingt, weist nur ein sehr begrenzter Einfallswinkelbereich in den Endkappen eine merkliche Statistik auf. Winkel, die wesentlich von dem senkrechten Einfall abweichen, sind deshalb für Untersuchungen ungeeignet.

³Zu beachten ist, daß z für die hintere Endkappe stets negativ ist.

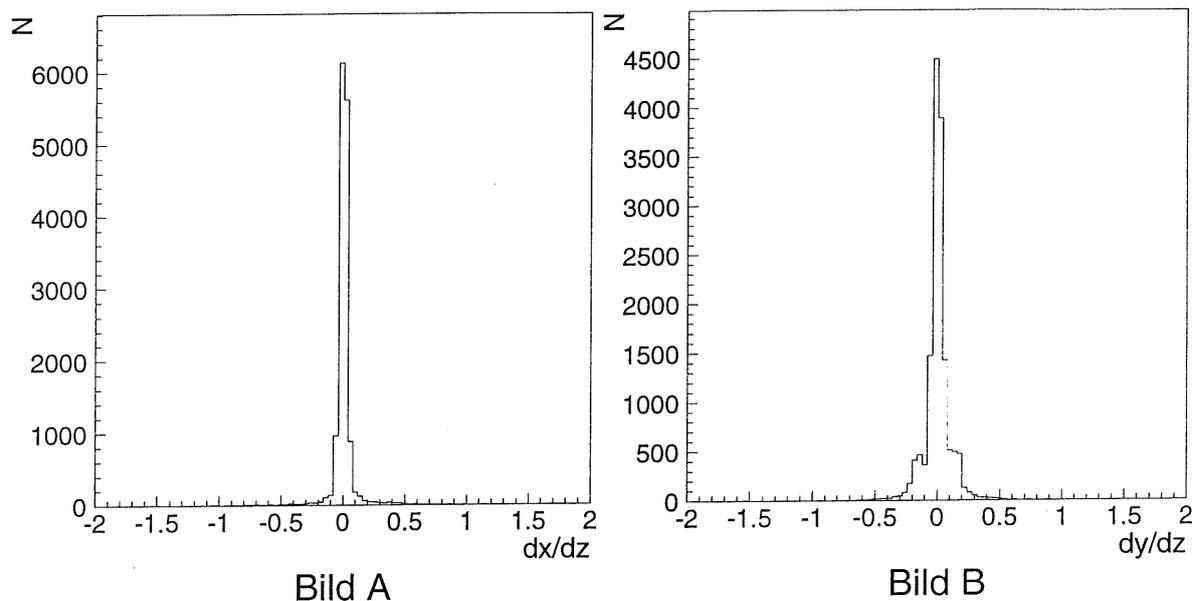


Abbildung 6.25: Winkelverteilung für Strahl-Halo-Myonen für die Steigung $\frac{dx}{dz}$ in Bild A und für die Steigung $\frac{dy}{dz}$ in Bild B

Untersucht man die Abhängigkeit der Nachweiswahrscheinlichkeit für die Drahtlage 6 und Drahtlage 7 $\varepsilon_{(6+7)}$ von dem auf die Flugzeit korrigierten t_0 , so erkennt man in der Abbildung 6.26 kaum eine Abhängigkeit.

Untersucht man jedoch die Abhängigkeit der Nachweiswahrscheinlichkeit für die Drahtlagen 6 und 7 $\varepsilon_{(6+7)}$ von dem auf die Flugzeit korrigierten t_0 *getrennt* für die vordere und die hintere Endkappe, so erkennt man sehr wohl ein Maximum in den Bildern A und B der Abbildung 6.27, das für die hintere Endkappe zu höherem t_0 verschoben ist.

Also ist auch hier die erwartete Abhängigkeit der Nachweiswahrscheinlichkeit von dem auf die Flugzeit korrigierten t_0 (wenn das Maximum dieser Verteilung für die hintere Endkappe auch verschoben ist) sichtbar, deren Ursache in dem gleichen Grund (also darin, daß Myonen, die wesentlich früher oder später als zu der Zeit, bei der die Datennahme ausgelöst wird, den vermeintlichen Wechselwirkungspunkt erreichen, nicht ausgelesen werden) zu finden ist wie bei der Abhängigkeit der Lagennachweiswahrscheinlichkeit von dem korrigierten t_0 bei kosmischen Myonen (vgl. Abbildung 6.7).

Man erkennt in Abbildung 6.28 keine Abhängigkeit der Nachweiswahrscheinlichkeit der Drahtlagen 6 und 7 $\varepsilon_{(6+7)}$ von der Modulnummer. Man sieht desweiteren, daß in den Zentralbereichsmodulen überhaupt keine Einträge zu verzeichnen sind.

Für die Untersuchungen der Nachweiswahrscheinlichkeit von den Steigungen

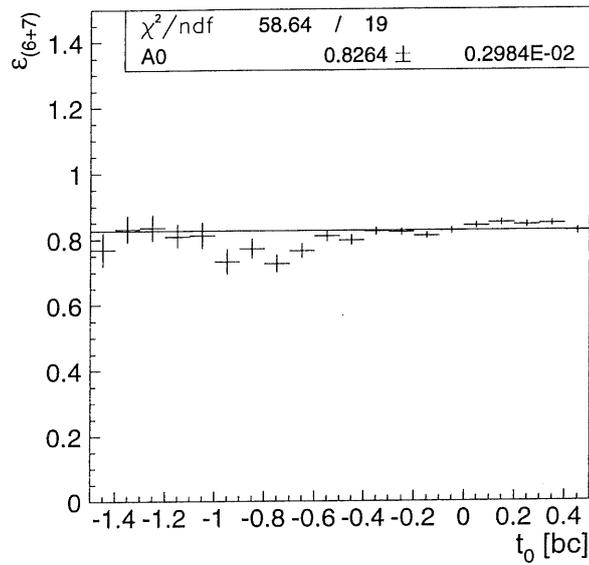


Abbildung 6.26: Abhängigkeit der Nachweiswahrscheinlichkeit der Drahtlagen von der Zeit t_0

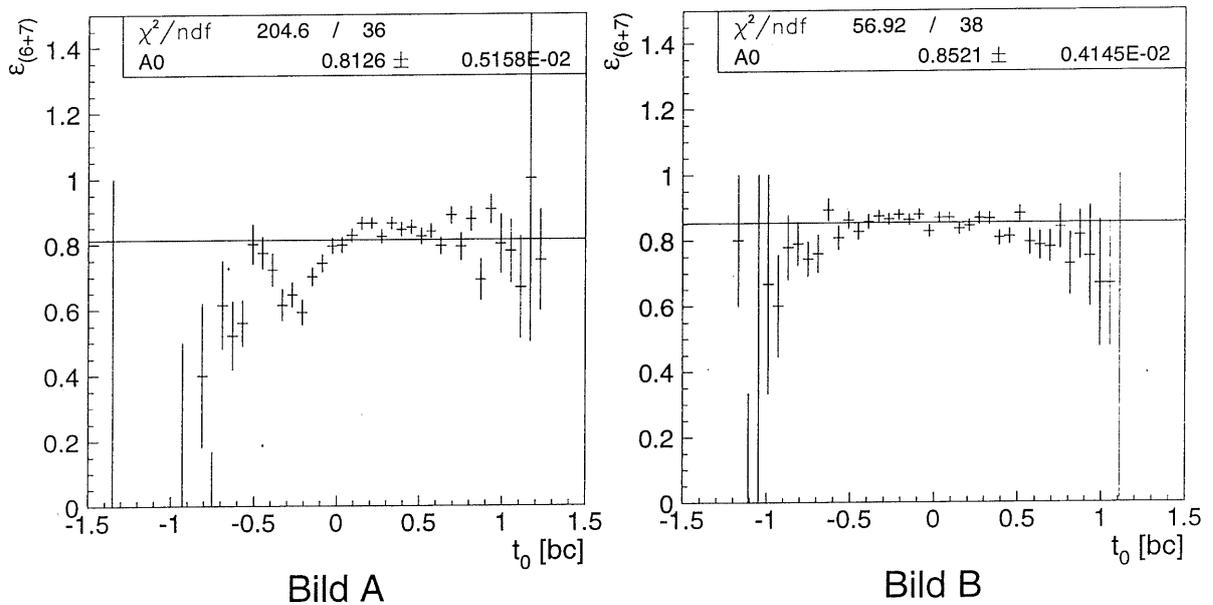


Abbildung 6.27: Abhängigkeit der Nachweiswahrscheinlichkeit der Drahtlagen 6 und 7 von der Zeit t_0 , getrennt nach hinterer (Bild A) und vorderer Endkappe (Bild B)

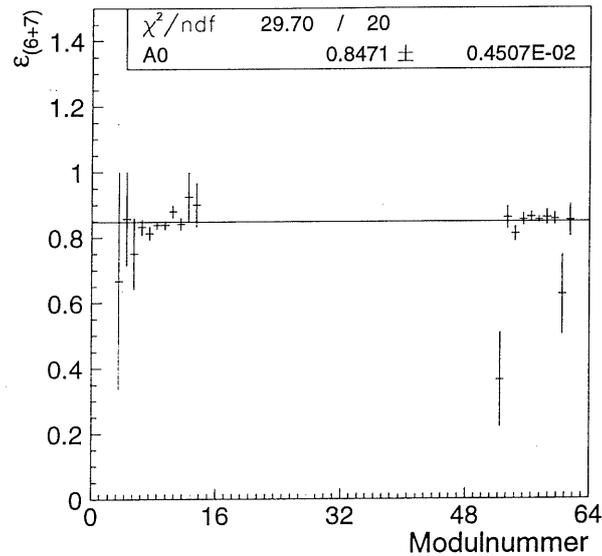


Abbildung 6.28: Abhängigkeit der Nachweiswahrscheinlichkeit der Drahtlagen von der Modulnummer

senkrecht zu den Streifen und senkrecht zu den Drähten reichen die Daten nicht aus, da die Strahl-Halo-Myonen nahezu ausschließlich senkrecht einfallen (vgl. Abbildung 6.25).

2. Für die Resultate der Abhängigkeit der Nachweiswahrscheinlichkeit der Streifenlagen läßt sich folgendes feststellen:

Die Abbildung 6.29 soll die Ergebnisse der Untersuchungen der Abhängigkeiten der Nachweiswahrscheinlichkeit der Streifenlagen mit Strahl-Halo-Myonen veranschaulichen:

Es läßt sich keine Abhängigkeit der Nachweiswahrscheinlichkeit der Streifenlage 14 $\varepsilon_{(14)}$ von der Zeit t_0 (dargestellt in Bild A der Abbildung 6.29) und von der Modulnummer (dargestellt in Bild B der Abbildung 6.29) erkennen.

Zusammenfassend läßt sich feststellen, daß die Untersuchungsergebnisse der Nachweiswahrscheinlichkeit von Strahl-Halo-Myonen die Ergebnisse, die für kosmische Myonen in Kapitel 6.1 herausgefunden wurden, bestätigen.

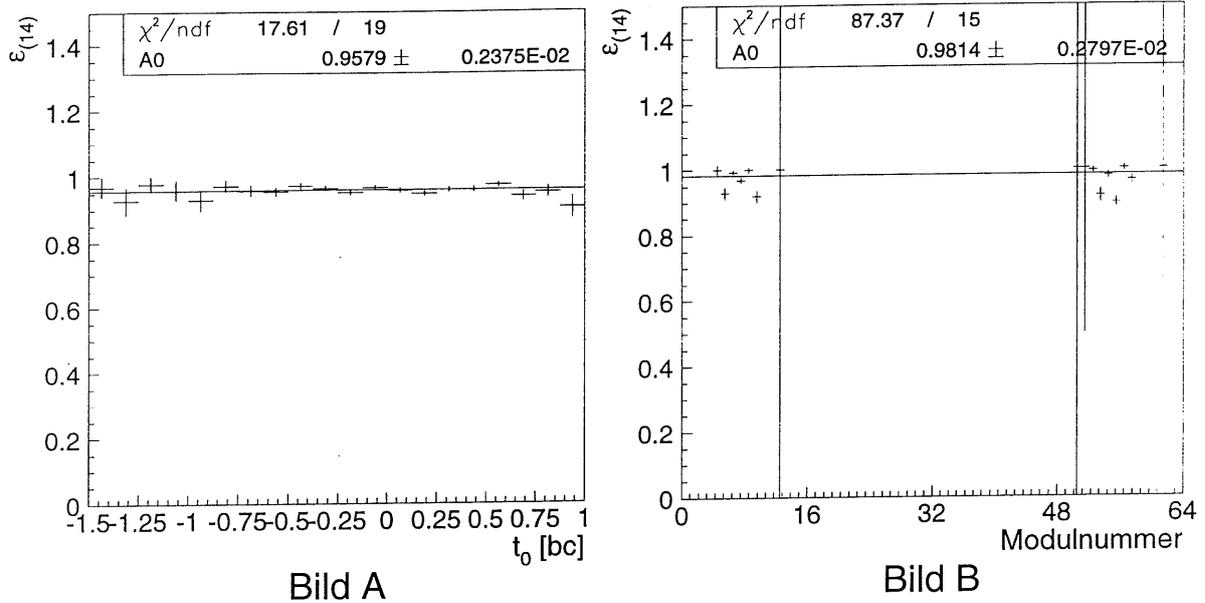


Abbildung 6.29: Abhängigkeit der Nachweiswahrscheinlichkeit der Streifenlage 14 von der Zeit t_0 (Bild A) und von der Modulnummer (Bild B)

6.3 Vergleich der Untersuchungsergebnisse mit Myonen aus der Monte-Carlo Simulation

Myonen aus der Monte-Carlo Simulation wurden erzeugt, um die Ergebnisse der Untersuchungen mit realen Daten (vor allem die Ergebnisse für kosmische Myonen) vergleichen zu können und bei eventuellen Abweichungen die Simulation korrigieren zu können.

Für die Untersuchungen wurden 20000 Myonen generiert, die bis zu 10 GeV Impuls haben und im H1-Koordinatensystem in dem azimuthalen Winkelbereich ϕ und in dem polaren Winkelbereich θ gleichverteilt sind. An die Generation der Myonen anschließend wurde der Detektoreinfluß auf diese Myonen simuliert [Mey91] und danach wurden diese rekonstruiert. Die rekonstruierten Daten der Myonen aus der Monte-Carlo Simulation wurden durch das (geringfügig modifizierte) Programm, das schon für die realen Daten verwendet wurde, analysiert.

Abgesehen von dem Vergleich mit realen Daten, sollten die Myonen aus der Monte-Carlo Simulation ebenfalls dazu dienen, die Funktionsweise des Programms, das bisher nur für reale Daten benutzt wurde, zu verifizieren. Da man bei Monte-Carlo simulierten Myonen alle Parameter kennt, läßt sich so die Arbeitsweise von Programmen unabhängig überprüfen.

Es ist in der Monte-Carlo Simulation von Myonen vorgesehen, daß der Benutzer eine gewünschte durchschnittliche Nachweiswahrscheinlichkeit für die Drahtlagen vorgeben

kann. Diese Nachweiswahrscheinlichkeit ist auf 80 % eingestellt. Bei der Analyse ergab sich bei dieser voreingestellten Nachweiswahrscheinlichkeit für die Drahtlagen das Problem, daß diese Nachweiswahrscheinlichkeit mit dem verwendeten Analyseprogramm *nicht* reproduziert werden konnte (vgl. auch Abbildung 6.30, in der die Nachweiswahrscheinlichkeit der Drahtlagen 6 und 7 $\varepsilon_{(6+7)}$ in Abhängigkeit von der Steigung *senkrecht zu den Streifen* („Streifenwinkel“, Bild A) und *senkrecht zu den Drähten* („Drahtwinkel“, Bild B) aufgetragen ist. Es ist eine mittlere Nachweiswahrscheinlichkeit zu erkennen, die deutlich über 90 % liegt, wie die Größe A0 in diesen beiden Abbildungen beweist).

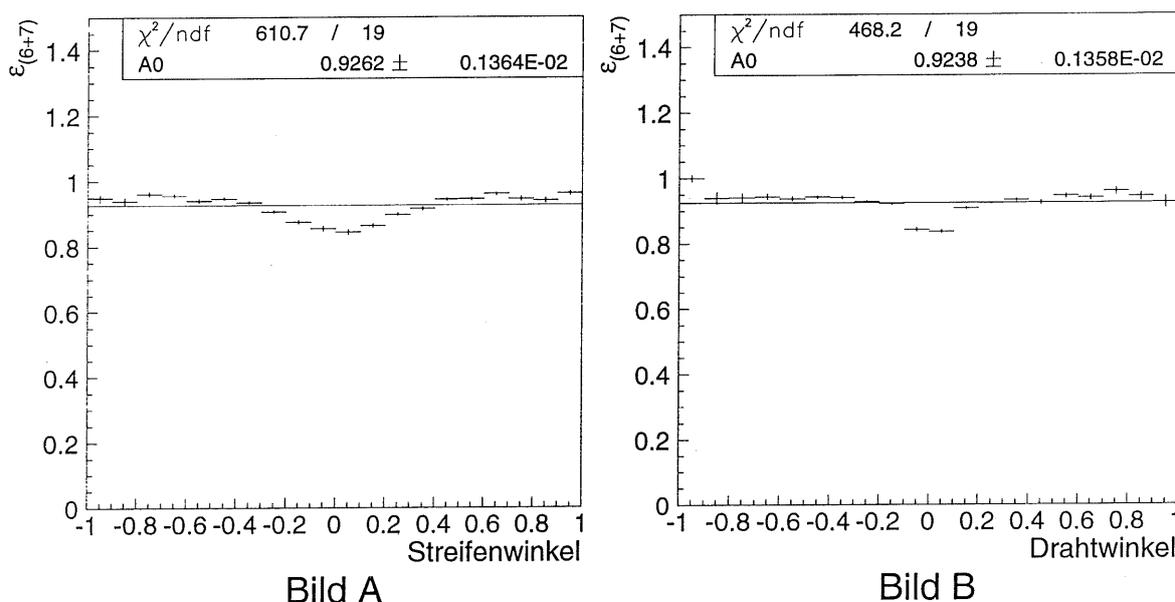


Abbildung 6.30: Abhängigkeit der Nachweiswahrscheinlichkeit der Drahtlagen von der Steigung *senkrecht zu den Streifen* (Bild A) und *senkrecht zu den Drähten* (Bild B)

Nach Studium des Quellcodes für die Simulation von Monte-Carlo Myonen stellte sich heraus, daß nicht das verwendete Analyseprogramm verantwortlich für die falsch reproduzierte Lagennachweiswahrscheinlichkeit war — wie zuerst angenommen — sondern, daß die Simulation selber die zu hohe Lagennachweiswahrscheinlichkeit erzeugte.

Dieses Verhalten kommt dadurch zustande, daß (wie weiter oben in Kapitel 5.3 schon erwähnt) Spuren minimalionisierender Teilchen, die das instrumentierte Eisen passieren, in dem Simulationsprogramm in *Streamerzellen* zerlegt werden. Jede dieser Streamerzellen kann veranlassen, daß ein Draht des instrumentierten Eisens getroffen gemeldet wird.

Die Monte-Carlo Simulation macht bei einer voreingestellten Lagennachweiswahrscheinlichkeit von 80 % bisher den Fehler, die Lagennachweiswahrscheinlichkeit über die *Streamerzellen* zu bestimmen. Dabei wird vernachlässigt, daß pro Lage mehr als nur eine Streamerzelle gesetzt werden kann (vor allem bei *nicht* senkrechtem Einfall

des minimalionisierenden Teilchens in die Streamerrohrkammern). Dadurch wird eine Abhängigkeit von der Steigung *senkrecht zu den Streifen* und eine mittlere Lagennachweiswahrscheinlichkeit von über 90 % erzeugt.

Korrigiert man — bei einer voreingestellten Lagennachweiswahrscheinlichkeit von 80 % — die Monte-Carlo Simulation dahingehend, daß 80 % der *Drahtlagen* des instrumentierten Eisens als getroffen deklariert werden — also *nicht* die *Streamerzellen* werden betrachtet — so läßt sich tatsächlich die voreingestellten Lagennachweiswahrscheinlichkeit von *ca.* 80 % reproduzieren, wie in den Abbildungen 6.35 und 6.36 zu erkennen ist, in denen eine mittlere Lagennachweiswahrscheinlichkeit $\varepsilon_{(6+7)}$ von etwa 80 % erzielt wurde.

Bei den Untersuchungen betreffend der *Multiplizität* von Myonen aus der Monte-Carlo Simulation wurden die Abhängigkeiten von:

- der Lagenummer,
- der Modulnummer,
- dem Impuls,
- dem Einfallswinkel in die Streamerrohrkammern senkrecht zu den Streifen und
- dem Einfallswinkel in die Streamerrohrkammern senkrecht zu den Drähten

betrachtet.

Bei der Monte-Carlo Simulation muß eine minimale Spurlänge im aktiven Volumen einer Streamerröhre vorgegeben werden (vgl. Kapitel 5.3). Für die Bestimmung der Multiplizitäten für Myonen aus der Monte-Carlo Simulation wurde schon eine korrigierte minimale Spurlänge im aktiven Volumen einer Streamerröhre verwendet (vgl. Abbildung 6.38 mit der zugehörigen Tabelle 6.1), da sich bei der nominellen minimalen Spurlänge deutlich zu hohe Multiplizitätswerte ergaben (insbesondere wurde eine zu große Winkelabhängigkeit von dem Einfallswinkel *senkrecht zu den Drähten* und dadurch auch eine zu große Modulabhängigkeit der Drahtlagenmultiplizität simuliert).

1. Für die Resultate der Abhängigkeiten der Multiplizität der **Drahtlagen** läßt sich folgendes feststellen:

Man erkennt keine Abhängigkeit der Drahtlagenmultiplizität von der Lagenummer, wie man an Bild A der Abbildung 6.31 erkennt, in dem die Drahtlagenmultiplizität $N_{Treffer}$ gegen die Lagenummer aufgetragen ist.

Des weiteren ist in dieser Abbildung zu sehen, daß die mittlere Drahtlagenmultiplizität von Myonen aus der Monte-Carlo Simulation und von realen Myonen

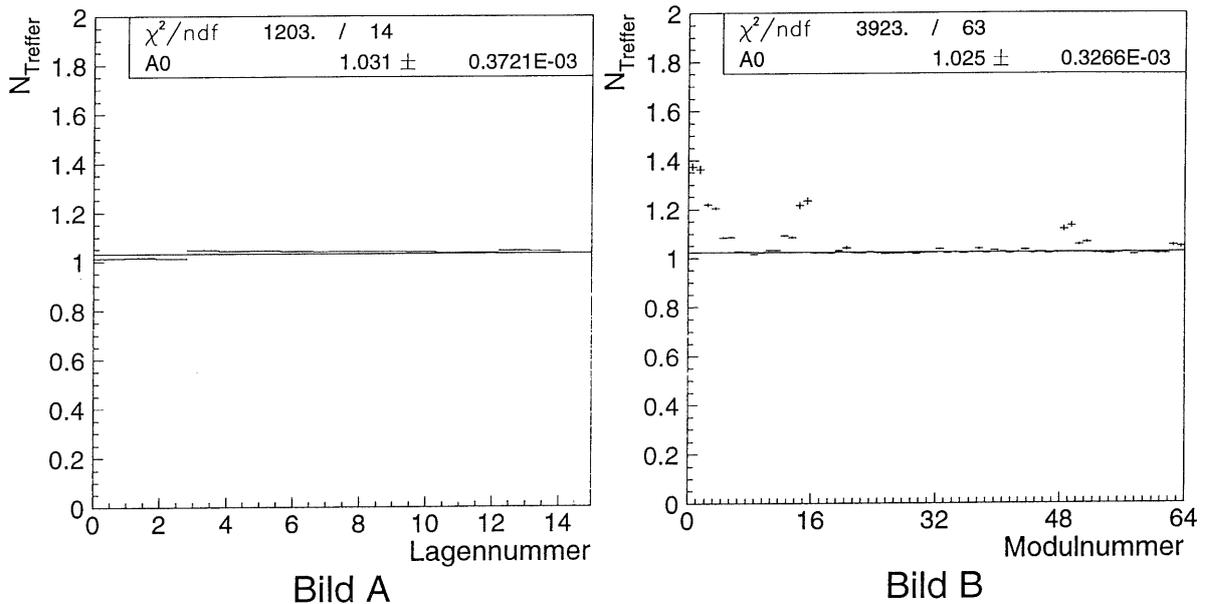


Abbildung 6.31: Abhängigkeit der Drahtlagenmultiplizität von der Lagennummer (Bild A) und von der Modulnummer (Bild B)

(vgl. Abbildung 6.1) (im Rahmen der Fehler) übereinstimmt (diese Erkenntnis läßt sich auch aus dem Vergleich anderer Abbildungen von Abhängigkeiten bezüglich der Drahtlagenmultiplizität von Monte-Carlo simulierten Myonen (Abbildung 6.32 bzw. Abbildung 6.33) mit entsprechenden Abbildungen von realen Myonen (Abbildung 6.2 bzw. Abbildung 6.3) gewinnen).

Bei den Endkappen tritt eine deutliche Abhängigkeit der Multiplizität der Drahtlagen $N_{Treffer}$ von der Modulnummer für Myonen aus der Monte-Carlo Simulation auf. Die Multiplizität ist bei $y = 0$ minimal und nimmt mit ansteigendem und fallendem y -Wert symmetrisch zu höheren Multiplizitätswerten zu. Diese Abhängigkeit ist in Bild B der Abbildung 6.31 festgehalten. Genau wie bei kosmischen Myonen liegt der Grund der Modulabhängigkeit in einem geometrischen Effekt: Je entfernter die Module in den Endkappen von der Strahlachse in z -Richtung entfernt sind, desto mehr Drähte können pro Modul getroffen werden.

Deutlich zu sehen ist, daß die Modulabhängigkeit in der hinteren Endkappe stärker als in der vorderen Endkappe ist. Dieser Unterschied wurde in Kapitel 6.1 schon mit der asymmetrischen Lage (bezüglich der z -Koordinate) des e - p -Wechselwirkungspunktes im H1-Detektor begründet.

Im Zentralbereich des zentralen Myondetektors ist nur eine geringe Abhängigkeit der Multiplizität von der Modulnummer zu verzeichnen, wie an Bild B der Abbildung 6.31 zu sehen ist, in dem einzelne Module mit geringfügig höherer Multiplizität zu sehen sind.

Es läßt sich weiterhin keine Abhängigkeit der Drahtlagenmultiplizität $N_{Treffer}$ vom Impuls (für Impulse kleiner 10 GeV) des durchgehenden Myons nachweisen, wie Abbildung 6.32 belegt, in der die Drahtlagenmultiplizität in Abhängigkeit vom Impuls dargestellt wurde.

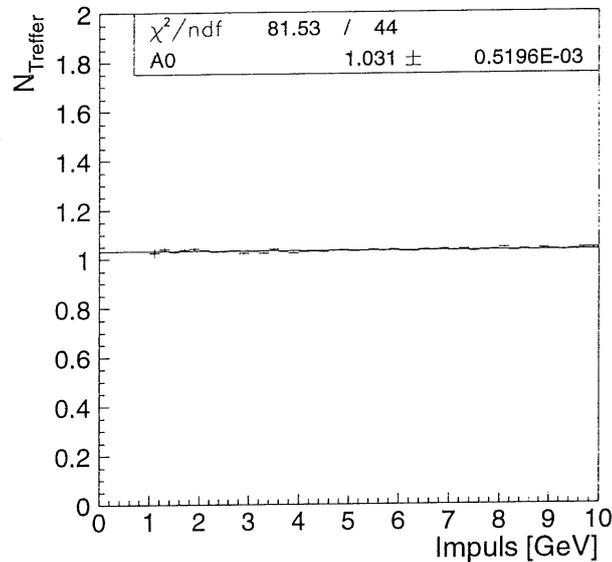


Abbildung 6.32: Abhängigkeit der Drahtlagenmultiplizität vom Impuls

Es tritt keine Abhängigkeit der Drahtlagenmultiplizität $N_{Treffer}$ von dem „Streifenwinkel“ auf (vgl. Bild A der Abbildung 6.33). Korreliert mit der Modulabhängigkeit der Multiplizität der Drahtlagen ist eine Abhängigkeit der Multiplizität von dem „Drahtwinkel“, dargestellt in Bild B der Abbildung 6.33, das schon in Kapitel 6.1 für die kosmischen Myonen begründet wurde.

2. Für die Resultate der Abhängigkeiten der Multiplizität der **Streifenlagen** läßt sich folgendes feststellen:

Es läßt sich — analog der Drahtlagen — keine Abhängigkeit der Streifenlagenmultiplizität von der Lagenummer nachweisen.

Ebenfalls läßt sich keine systematische Abhängigkeit der Streifenlagenmultiplizität von der Modulnummer erkennen.

Für Impulse kleiner als 10 GeV tritt keine Abhängigkeit der Multiplizität der Streifenlagen vom Impuls auf.

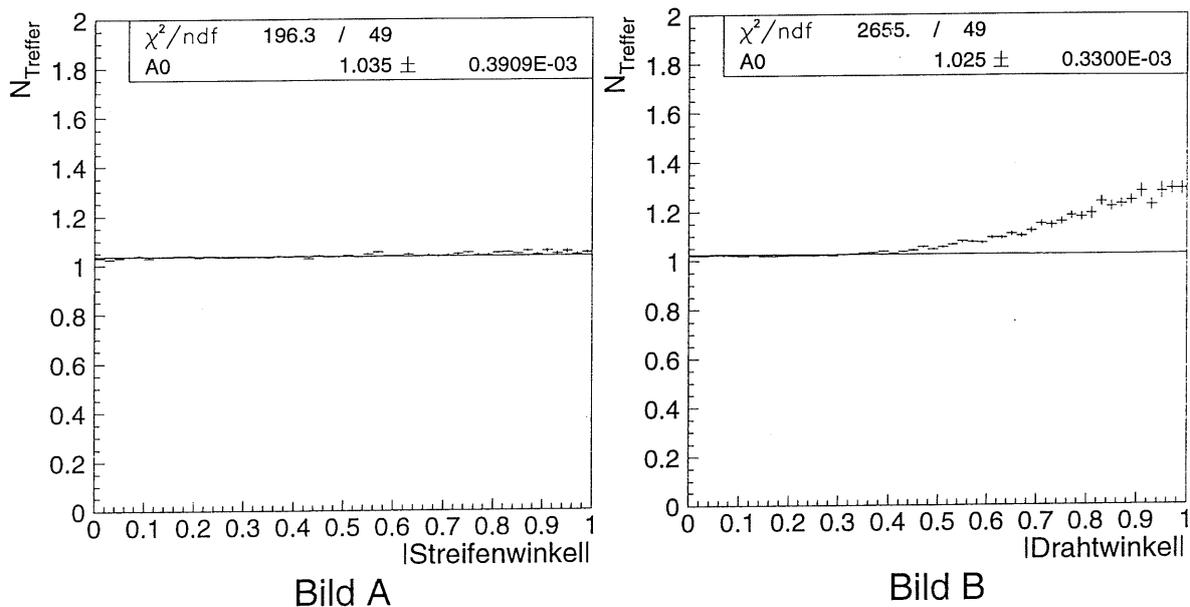


Abbildung 6.33: *Abhängigkeit der Drahtlagenmultiplizität von der Steigung senkrecht zu den Streifen (Bild A) und senkrecht zu den Drähten (Bild B)*

Faßt man die Einfallswinkel in die Streamerrohrkammern zu Einfallswinkeln *senkrecht zu den Streifen* und zu Einfallswinkeln *senkrecht zu den Drähten* zusammen, so ist:

- weder eine Abhängigkeit der Streifenlagenmultiplizität $N_{Treffer}$ von der Steigung *senkrecht zu den Streifen* (dem „Streifenwinkel“, in Bild A der Abbildung 6.34 dargestellt),
- noch eine Abhängigkeit der Streifenlagenmultiplizität $N_{Treffer}$ von der Steigung *senkrecht zu den Drähten* (dem „Drahtwinkel“, in Bild B der Abbildung 6.34 dargestellt) erkennbar.

Weiterhin läßt sich feststellen, daß die mittlere Streifenlagenmultiplizität für Monte-Carlo simulierte Myonen mit der mittleren Streifenlagenmultiplizität für reale Myonen übereinstimmt.

Bei den Untersuchungen betreffend der *Lagennachweiswahrscheinlichkeit* von Myonen aus der Monte-Carlo Simulation wurden die Abhängigkeiten von:

- der Modulnummer,
- dem Impuls,
- dem Einfallswinkel in die Streamerrohrkammern senkrecht zu den Streifen und

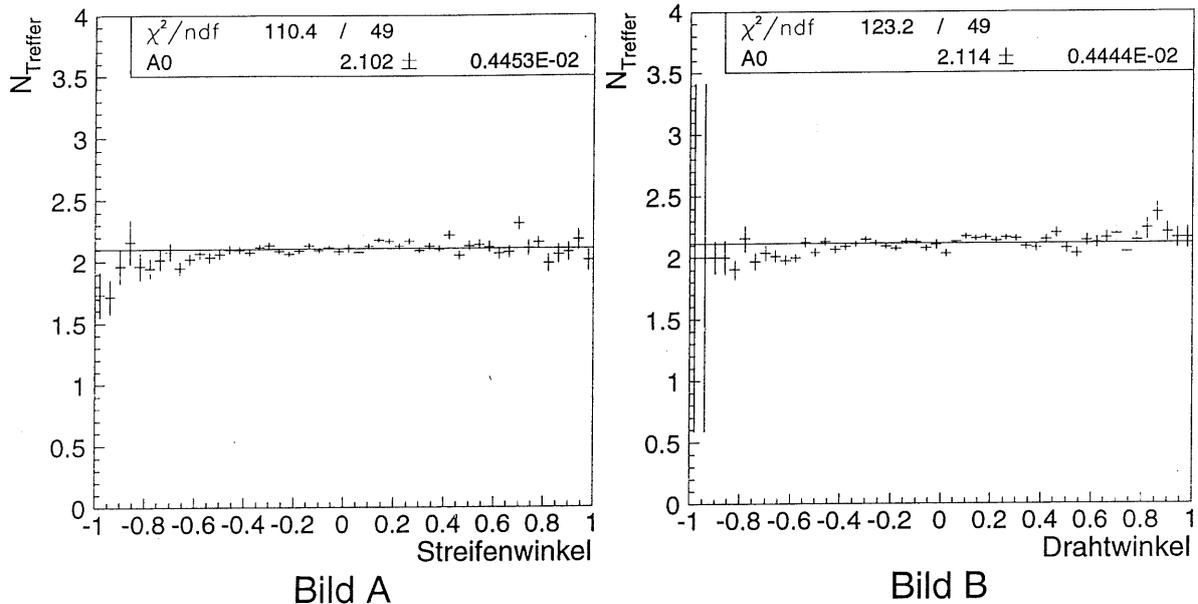


Abbildung 6.34: Abhängigkeit der Streifenlagenmultiplizität von der Steigung senkrecht zu den Streifen (Bild A) und senkrecht zu den Drähten (Bild B)

- dem Einfallswinkel in die Streamerrohrkammern senkrecht zu den Drähten betrachtet.

1. Für die Resultate der Abhängigkeit der **Nachweiswahrscheinlichkeit der Drahtlagen** läßt sich folgendes feststellen:

Anders als bei den realen Daten (vgl. Abbildung 6.8) zeigt Bild A der Abbildung 6.35, in dem die Lagennachweiswahrscheinlichkeit $\varepsilon_{(6+7)}$ gegen die Modulnummer aufgetragen ist, *keine* systematische Modulabhängigkeit. Dies ist ein Hinweis darauf, daß die Modulabhängigkeit, die bei den realen Myonen auftritt, tatsächlich durch den Temperaturgradienten bzw. die unterschiedliche Gasqualität hervorgerufen wird, da diese beiden Phänomene in der Simulation keine Berücksichtigung finden.

Genau wie bei den realen Daten weist die Nachweiswahrscheinlichkeit der Drahtlagen keine Abhängigkeit von Impulsen kleiner als 10 GeV der detektierten minimalionisierenden Partikel auf (vgl. Bild B der Abbildung 6.35, in dem die Nachweiswahrscheinlichkeit der Drahtlagen 6 und 7 $\varepsilon_{(6+7)}$ gegen den Impuls aufgetragen ist).

Bei Myonen aus der Monte-Carlo Simulation ging man bisher von einer Abhängigkeit der Nachweiswahrscheinlichkeit der Drahtlagen von der Steigung

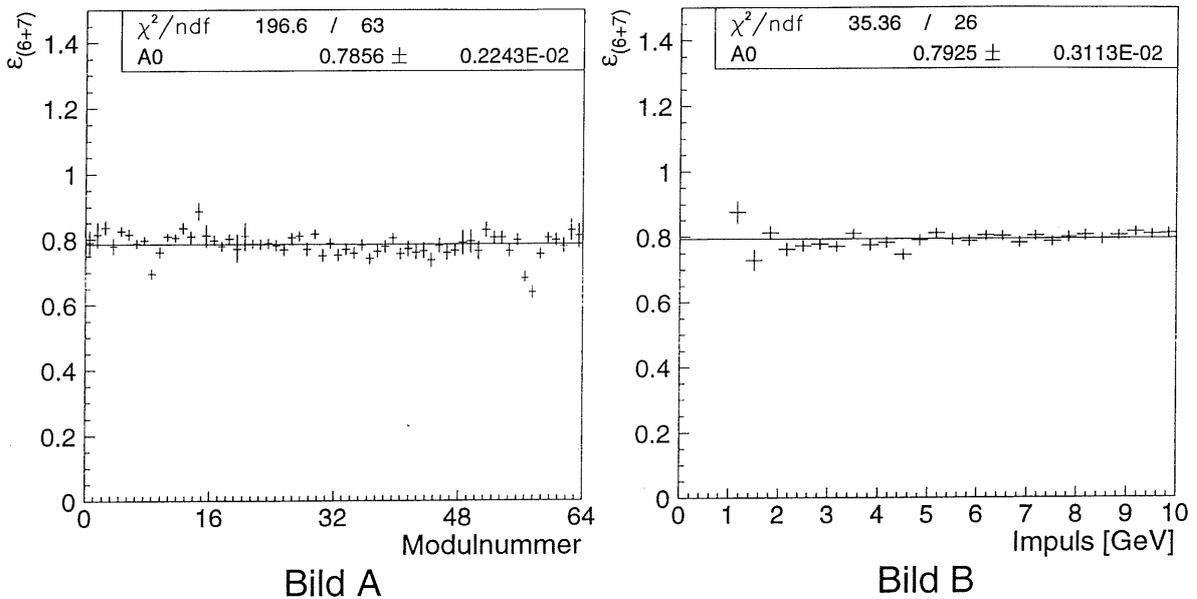


Abbildung 6.35: Abhängigkeit der Nachweiswahrscheinlichkeit der Drahtlagen von der Modulnummer (Bild A) und vom Impuls (Bild B)

senkrecht zu den Streifen („Streifenwinkel“) in den Modulen des instrumentierten Eisens aus, die (wie in Kapitel 5.3 beschrieben) dadurch zustande kommt, daß bei größer werdender Steigung *senkrecht zu den Streifen* mehr Streamerzellen in eine Streamerröhre gelegt werden können. Jede dieser Streamerzellen kann ein Signal auf dem Draht auslösen, weshalb die Nachweiswahrscheinlichkeit *senkrecht zu den Streifen* ansteigen müßte.

Dieses Verhalten ist jedoch *nicht* bei den realen Daten zu beobachten (vgl. Bild A der Abbildung 6.13). Bei Bild A der Abbildung 6.30 ist diese Abhängigkeit für Monte-Carlo simulierte Myonen allerdings noch mit einem Anstieg der Nachweiswahrscheinlichkeit mit größer werdender Steigung *senkrecht zu den Streifen* zu beobachten. In dieser Abbildung ist die Nachweiswahrscheinlichkeit der Drahtlagen 6 und 7 $\varepsilon_{(6+7)}$ gegen die Steigung *senkrecht zu den Streifen* aufgetragen (allerdings für die falsch bestimmte mittlere Nachweiswahrscheinlichkeit von über 90 %).

Korrigiert man die Monte-Carlo Simulation dahingehend, daß man die mittlere Nachweiswahrscheinlichkeit richtig bestimmt, dann kann man auch bei den Monte-Carlo simulierten Daten — vergleichbar mit den realen Daten — *keine* Abhängigkeit der Nachweiswahrscheinlichkeit der Drahtlagen $\varepsilon_{(6+7)}$ von der Steigung *senkrecht zu den Streifen* beobachten, wie das Bild A der Abbildung 6.36 beweist. Dieses weist den qualitativ gleichen Verlauf auf wie Bild A der Abbildung 6.13.

Wie in Kapitel 5.3 beschrieben, wird in der Monte-Carlo Simulation davon aus-

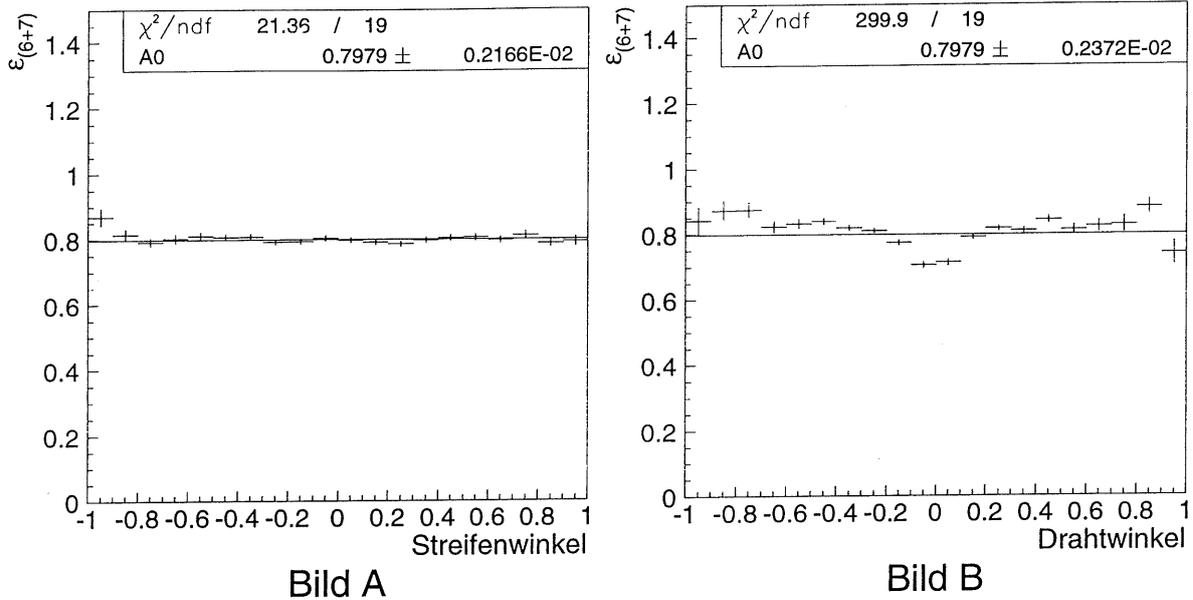


Abbildung 6.36: Abhängigkeit der Nachweiswahrscheinlichkeit der Drahtlagen von der Steigung *senkrecht zu den Streifen* (Bild A) und *senkrecht zu den Drähten* (Bild B)

gegangen, daß eine Abhängigkeit der Nachweiswahrscheinlichkeit der Drahtlagen von der Steigung *senkrecht zu den Drähten* auftritt — bedingt durch die Ineffizienzen, die durch die Streamerrohrwände hervorgerufen werden und durch die minimale Spurlänge im aktiven Volumen einer Streamerröhre.

Diese Abhängigkeit, also eine geringere Nachweiswahrscheinlichkeit bei nahezu senkrechtem Einfall (relativ zu den Drähten) in die Myonkammern, ist in Bild B der Abbildung 6.30 zu erkennen. Allerdings wurde bei der Erstellung dieser Abbildung noch die falsche durchschnittliche Nachweiswahrscheinlichkeit der Drahtlagen $\varepsilon_{(6+7)}$ verwendet (nämlich über 90 %).

Des weiteren wurde in der Simulation die minimale Spurlänge im aktiven Volumen einer Streamerröhre zu klein gewählt, so daß der geringe Anstieg der Nachweiswahrscheinlichkeit mit größer werdendem Einfallswinkel *senkrecht zu den Drähten*, der bei realen Myonen auftritt, nicht zu verzeichnen ist.

Erst wenn man die durchschnittliche Nachweiswahrscheinlichkeit korrekt (mit dem oben beschriebenen Verfahren) bestimmt, die Wandstärke auf den nominalen Wert setzt und eine größere minimale Spurlänge im aktiven Volumen einer Streamerröhre in der Simulation vorgibt, dann ist die Abhängigkeit der Nachweiswahrscheinlichkeit der Drahtlagen von der Steigung *senkrecht zu den Drähten* vergleichbar mit der Abhängigkeit, die bei realen Myonen auftritt. Dies kann man an einem Vergleich zwischen Bild B der Abbildung 6.36, in dem die Nachweiswahrscheinlichkeit der Drahtlagen 6 und 7 $\varepsilon_{(6+7)}$ gegen der Steigung *senkrecht zu den Drähten* (für Monte-Carlo simulierte Myonen) aufgetragen ist und Bild B der Abbildung 6.13 (für kosmische Myonen) nachvollziehen.

Bei der Abhängigkeit sowohl der Multiplizität als auch der Nachweiswahrscheinlichkeit der Drahtlagen von der Steigung *senkrecht zu den Drähten* wurde überprüft, ob die Simulation *nach den Korrekturen* die realen Daten besser beschreiben kann.

Bei zwei nebeneinanderliegenden Streamerrohrzellen im Zentralbereich in der x - y -Ebene (in den beiden Endkappen in der y - z -Ebene), die von Myonen unter vorgegebenem Einfallswinkel ϕ *senkrecht zu den Drähten* passiert werden (vgl. Abbildung 6.37), ist davon auszugehen, daß im statistischen Mittel alle Punkte der beiden Streamerrohrzellen gleich häufig getroffen werden.

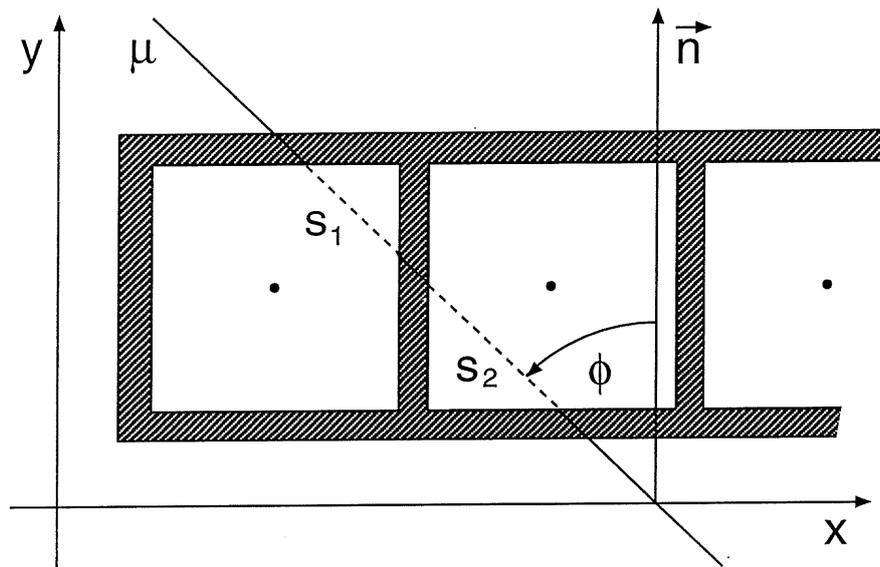


Abbildung 6.37: Querschnitt durch zwei nebeneinanderliegende Streamerrohrzellen

Nach den Annahmen in der Simulation (vgl. Kapitel 5.3) kann ein Draht einer Streamerrohrzelle nur getroffen gemeldet werden, wenn eine vorgegebene Mindestspurlänge s_{min} im aktiven Volumen einer Streamerröhre von dem betrachteten Myon zurückgelegt wurde. Eine andere Größe, die Einfluß auf die Spurlänge des Myons im aktiven Volumen einer Streamerrohrzelle nimmt, ist die Wandstärke, die eine Streamerrohrzelle begrenzt. Bedingt durch die Wände wird das aktive Volumen einer Streamerrohrzelle eingeschränkt.

Die *Nachweiswahrscheinlichkeit ohne Wandeffekte* der Streamerrohrzellen beeinflusst natürlich unmittelbar die Abhängigkeit der Nachweiswahrscheinlichkeit und die Abhängigkeit der Multiplizität der Drahtlagen von der Steigung *senkrecht zu den Drähten*.

Vergleicht man bei vorgegebenem Einfallswinkel ϕ für verschiedene Einfallspeditionen des Myons entlang der x -Achse in die Streamerrohrzellen die beiden entscheidenden Spurlängen s_1 und s_2 (vgl. Abbildung 6.37), die das Myon im *aktiven* Volumen der beiden Streamerrohrzellen zurücklegt, dann sind drei Fälle zu unterscheiden:

- Entweder *kein* Draht der beiden Streamerrohrzellen wird getroffen gemeldet ($s_1 < s_{min}$ und $s_2 < s_{min}$),
- oder *ein* Draht der beiden Streamerrohrzellen wird getroffen gemeldet ($s_1 \geq s_{min}$ oder $s_2 \geq s_{min}$),
- oder *beide* Drähte der Streamerrohrzellen werden getroffen gemeldet ($s_1 \geq s_{min}$ und $s_2 \geq s_{min}$).

In die korrigierte Simulation der Abhängigkeit, sowohl der Multiplizität als auch der Nachweiswahrscheinlichkeit der Drahtlagen von der Steigung *senkrecht zu den Drähten*, gehen die *Lagennachweiswahrscheinlichkeit ohne Wandeffekte*, die *Wandstärken* der Streamerrohrzellen und die *minimale Spurlänge* im aktiven Volumen einer Streamerröhre ein.

Um entscheiden zu können, wann mehr als eine Streamerröhre getroffen gemeldet wird, benutzt man die Funktion $d(\phi, s_{min})$. Für $d(\phi, s_{min}) < 0$ gibt $|d(\phi, s_{min})|$ den Anteil der bei dem Winkel ϕ untersuchten Ereignisse an, bei dem — bedingt durch die Ineffizienzen, die durch die Streamerrohrwände verursacht werden und bedingt durch die Geometrie — *kein* Draht getroffen gemeldet wird, $d(\phi, s_{min}) > 0$ gibt den Anteil der bei dem Winkel ϕ untersuchten Ereignisse an, bei dem *beide* Drähte der betrachteten Streamerrohrkammern ein Signal liefern.

Die Funktion $d(\phi, s_{min})$ wird wie folgt definiert [Kle95]:

$$d(\phi, s_{min}) = 1 - \frac{\Delta W}{\Delta X} + \frac{\Delta Y}{\Delta X} \cdot \tan|\phi| - 2 \cdot \frac{s_{min}}{\Delta X} \cdot \sin|\phi|. \quad (6.3)$$

Dabei ist ΔW die Wandstärke zwischen zwei Streamerrohrzellen, ΔX entspricht dem Abstand zwischen den Drähten zweier benachbarter Streamerrohrzellen, ΔY ist der Abstand zwischen zwei Wänden innerhalb einer Streamerrohrzelle, ϕ ist der Einfallswinkel *senkrecht zu den Drähten* und s_{min} ist die minimale Spurlänge im aktiven Volumen einer Streamerröhre⁴.

Es wurden insgesamt vier Funktionen gebildet, die man der Simulation dieser Abhängigkeiten zugrundelegt, je nachdem ob kein Draht, oder ein Draht, in den Streamerrohrzellen getroffen gemeldet werden ($d(\phi, s_{min}) \leq 0$), oder ob ein oder mehrere Drähte ein Signal geben ($d(\phi, s_{min}) \geq 0$) und ob die Lagennachweiswahrscheinlichkeit $\varepsilon_{(6+7)}$ oder die Multiplizität N_{Treff} bestimmt werden soll [Kle95]:

- für $d(\phi, s_{min}) \leq 0$:
 - für die Nachweiswahrscheinlichkeit:

$$\varepsilon_{6+7}(\bar{\varepsilon}, d) = \bar{\varepsilon} \cdot (1 + d), \quad (6.4)$$

⁴Es muß beachtet werden, daß in die Abhängigkeiten der Multiplizität und der Lagennachweiswahrscheinlichkeit von dem Einfallswinkel *senkrecht zu den Drähten* die *dreidimensionale* Spurlänge im aktiven Volumen einer Streamerröhre eingeht. Das hier verwendete Modell berücksichtigt allerdings nur die *zweidimensionale* Spurlänge, weshalb bei den hierfür verwendeten Ereignissen gefordert wurde, daß die Abweichung der zweidimensionalen Spurlänge $s(2D)$ von der dreidimensionalen Spurlänge $s(3D)$ klein ist: $\left| \frac{s(3D)}{s(2D)} \right| < 1, 2$.

– für die Multiplizität:

$$N_{Treffer} - 1 = y_0, \quad (6.5)$$

• für $d(\phi, s_{min}) \geq 0$:

– für die Nachweiswahrscheinlichkeit:

$$\varepsilon_{6+7}(\bar{\varepsilon}, d) = \bar{\varepsilon} \cdot (1 - d + d(2 - \bar{\varepsilon})), \quad (6.6)$$

– für die Multiplizität:

$$(N_{Treffer} - 1)(\bar{\varepsilon}, y_0, d) = y_0 + \frac{(1 - y_0) \cdot \bar{\varepsilon} \cdot d}{1 - d + d(2 - \bar{\varepsilon})}. \quad (6.7)$$

Dabei ist $\bar{\varepsilon}$ die Nachweiswahrscheinlichkeit der Drahtlagen *ohne* Wandeffekte, y_0 entspricht dem Wert der mittleren Multiplizität bei senkrechtem Einfall des Myons in eine Streamerrohrkammer und $d = d(\phi, s_{min})$ ist die oben definierte Funktion. $\bar{\varepsilon}$, y_0 und s_{min} sind die Parameter der Funktionen 6.4 bis 6.7, die an die Daten angepaßt werden.

In Bild B der Abbildung 6.38 ist *sowohl* die Abhängigkeit der Nachweiswahrscheinlichkeit $\varepsilon_{(6+7)}$ (im oberen Teil des Bildes) *als auch* die Abhängigkeit der Multiplizität $N_{Treffer}$ (im unteren Teil des Bildes) gegen den Betrag der Steigung *senkrecht zu den Drähten* für Myonen aus der Monte-Carlo Simulation dargestellt.

Die Abhängigkeit der Multiplizität der Drahtlagen von der Steigung *senkrecht zu den Drähten* ist als Verhältnis der Zahl der Ereignisse, bei denen mehr als ein Draht getroffen gemeldet wurde, zu der Summe aller Ereignisse dargestellt worden, was in diesem verwendeten Modell der „Multiplizität – 1“ entspricht.

An die Einträge in dieser Abbildung wurden die vier Funktionen 6.4 bis 6.7 angepaßt, die die Abhängigkeit der Nachweiswahrscheinlichkeit bzw. die Abhängigkeit der Multiplizität von der Steigung *senkrecht zu den Drähten* bei den Myonen aus der Monte-Carlo Simulation beschreiben. Bild A der Abbildung 6.38 stellt die gleichen Abhängigkeiten wie Bild B dar, allerdings für kosmische Myonen.

In den Funktionen 6.5 und 6.7, die die Abhängigkeit der *Multiplizität* der Drahtlagen von der Steigung *senkrecht zu den Drähten* für Myonen aus der Monte-Carlo Simulation beschreiben, wird davon ausgegangen, daß erst ab einer Steigung von ca. 0.4 (vgl. Bild B der Abbildung 6.38) ein getroffen gemeldeter Draht in der benachbarten Streamerrohrzelle aus geometrischen Gründen möglich wird. Vor allem kommt dieser Wert durch die vorgegebene minimale Spurlänge im aktiven Volumen der Streamerrohrkammer zustande: Erst wenn die Steigung *senkrecht zu den Drähten* den Wert von 0.4 überschreitet, werden die Längen s_1 und s_2 größer als die minimale Spurlänge im aktiven Volumen.

Bei größer werdender Steigung (für Steigungen größer als 0.4 bei Bild B der Abbildung 6.38) nimmt auch die Zahl der Ereignisse, bei denen s_1 und s_2 größer als die minimale Spurlänge im aktiven Volumen ist, zu, und damit steigt die Multiplizität an.

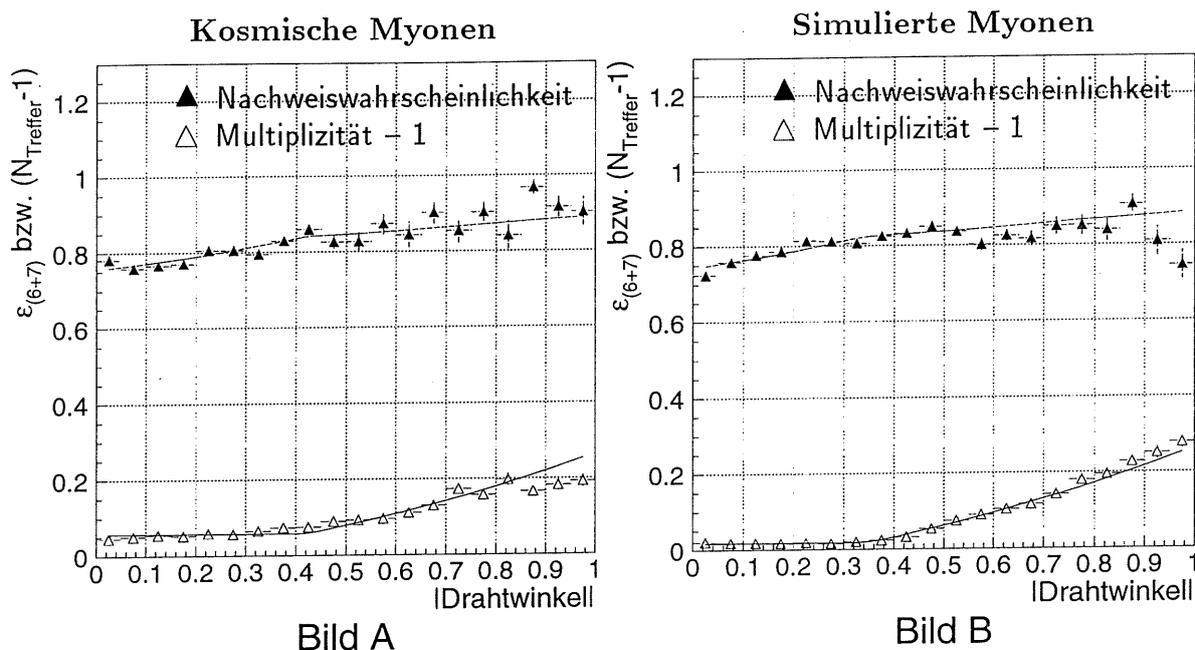


Abbildung 6.38: Abhängigkeit der Nachweiswahrscheinlichkeit und der Multiplizität der Drahtlagen von der Steigung senkrecht zu den Drähten für kosmische Myonen (Bild A) und für Myonen aus der Monte-Carlo Simulation (Bild B)

In der Funktionen 6.4 und 6.6, die die Abhängigkeit der *Nachweiswahrscheinlichkeit* der Drahtlagen von der Steigung *senkrecht zu den Drähten* für Myonen aus der Monte-Carlo Simulation beschreiben, wird davon ausgegangen, daß der Anstieg der Nachweiswahrscheinlichkeit für kleine Einfallswinkel (vgl. Bild B der Abbildung 6.38) durch die Ineffizienzen, die durch die Wände zwischen den Streamerrohrzellen verursacht werden, zustande kommt (vgl. Kapitel 5.3). Ab einer Steigung von 0.4 (vgl. Bild B der Abbildung 6.38) ist der Anstieg der Nachweiswahrscheinlich direkt korreliert mit dem Anstieg der Multiplizität für Steigungen größer 0.4.

Um zu verifizieren, daß die Abhängigkeit der Drahtlagen von der Steigung *senkrecht zu den Drähten* durch die Simulation korrekt beschrieben wird (also durch die oben beschriebenen Funktionen, die dem Verlauf der Daten für Myonen aus der Monte-Carlo Simulation in Bild B der Abbildung 6.38 folgen), paßt man an die Daten von Bild A der Abbildung 6.38 für *reale* Myonen die vier Funktionen mit den *gleichen* Parametern ($\bar{\varepsilon}$, y_0 und s_{min}) an. Für die Parameter ergeben sich die Werte aus der Tabelle 6.1.

In der Tabelle 6.1 sind die Parameter aufgeführt, mit denen die Myonen simuliert wurden (in der ersten Spalte), die Parameter, mit denen die Funktionen an die Daten von den Myonen aus der Monte-Carlo Simulation (Bild B der Abbildung 6.38) angepaßt wurden (in der zweiten Spalte) und die Parameter, mit denen die Funktionen an die Daten von den kosmischen Myonen (Bild A der Abbildung 6.38) angepaßt wurden (in der dritten Spalte).

Parameter	Simulation	Anpassung an simulierte μ	Anpassung an kosmische μ
$\bar{\epsilon}$	0,85	0,852 ($\pm 0,003$)	0,867 ($\pm 0,004$)
y_0	—	0,018 ($\pm 0,001$)	0,057 ($\pm 0,001$)
s_{min} [cm]	0,35	0,340 ($\pm 0,002$)	0,374 ($\pm 0,004$)
χ^2/ndf	—	89,67 / 37	153,0 / 37

Tabelle 6.1: Parameter $\bar{\epsilon}$, y_0 , s_{min} und χ^2/ndf der Funktionen 6.4 bis 6.7 in der Abbildung 6.38

Tatsächlich kann man anhand von Bild A der Abbildung 6.38 (und anhand der Tabelle 6.1) verifizieren, daß auch die Abhängigkeit der Multiplizität und Lagennachweiswahrscheinlichkeit der Drahtlagen von der Steigung *senkrecht zu den Drähten* bei *kosmischen Myonen* gut von dem einfachen Modell beschrieben wird: die angepaßten Funktionen folgen dem Verlauf der Daten.

2. Für die Resultate der Abhängigkeit der **Nachweiswahrscheinlichkeit der Streifenlagen** läßt sich folgendes feststellen:

Es läßt sich keine Abhängigkeit der Nachweiswahrscheinlichkeit der Streifenlagen von der Modulnummer erkennen, wie in Bild A der Abbildung 6.39 sichtbar ist, in dem die Nachweiswahrscheinlichkeit der Streifenlage 14 $\epsilon_{(14)}$ in Abhängigkeit von der Modulnummer dargestellt ist.

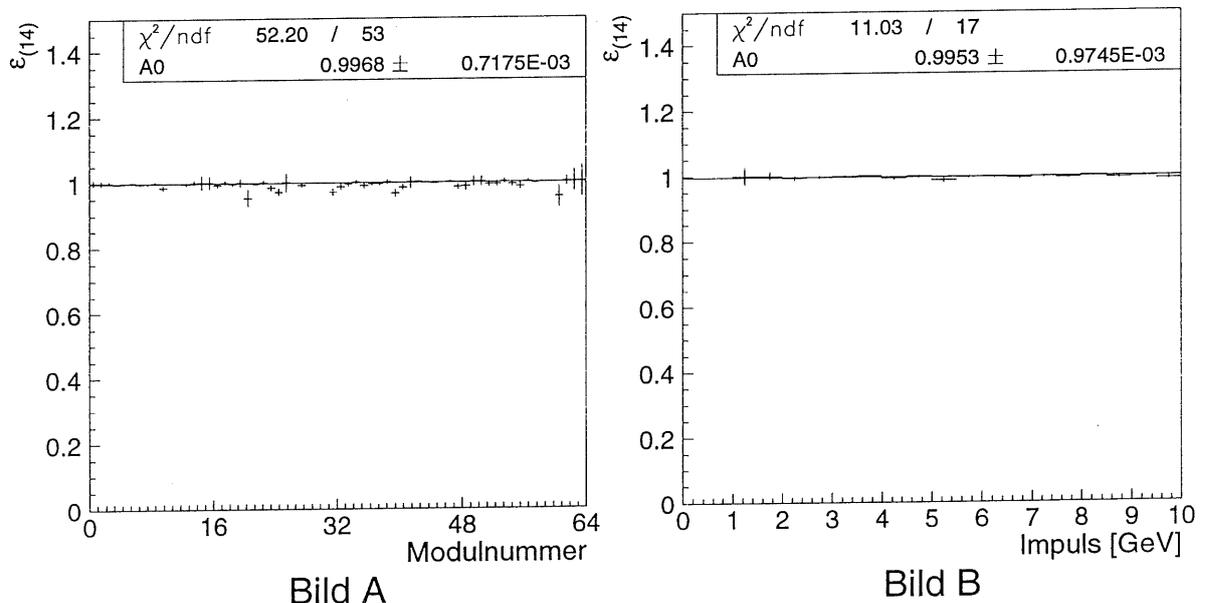


Abbildung 6.39: Abhängigkeit der Nachweiswahrscheinlichkeit der Streifenlage 14 von der Modulnummer (Bild A) und vom Impuls (Bild B)

Es läßt sich ebenfalls keine Abhängigkeit der Nachweiswahrscheinlichkeit der Streifenlagen von Impulsen kleiner als 10 GeV erkennen, wie Bild B der Abbildung 6.39 beweist, in dem die Nachweiswahrscheinlichkeit der Streifenlage 14 $\varepsilon_{(14)}$ gegen den Impuls des detektierten Teilchens dargestellt worden ist.

Eine Abhängigkeit der Nachweiswahrscheinlichkeit der Streifenlagen $\varepsilon_{(0+7+14)}$ von der Steigung *senkrecht zu den Streifen* („Streifenwinkel“) — in Bild A der Abbildung 6.40 dargestellt — läßt sich ebensowenig erkennen wie eine Abhängigkeit der Nachweiswahrscheinlichkeit der Streifenlagen $\varepsilon_{(0+7+14)}$ von der Steigung *senkrecht zu den Drähten* („Drahtwinkel“) — in Bild B der Abbildung 6.40 dargestellt:

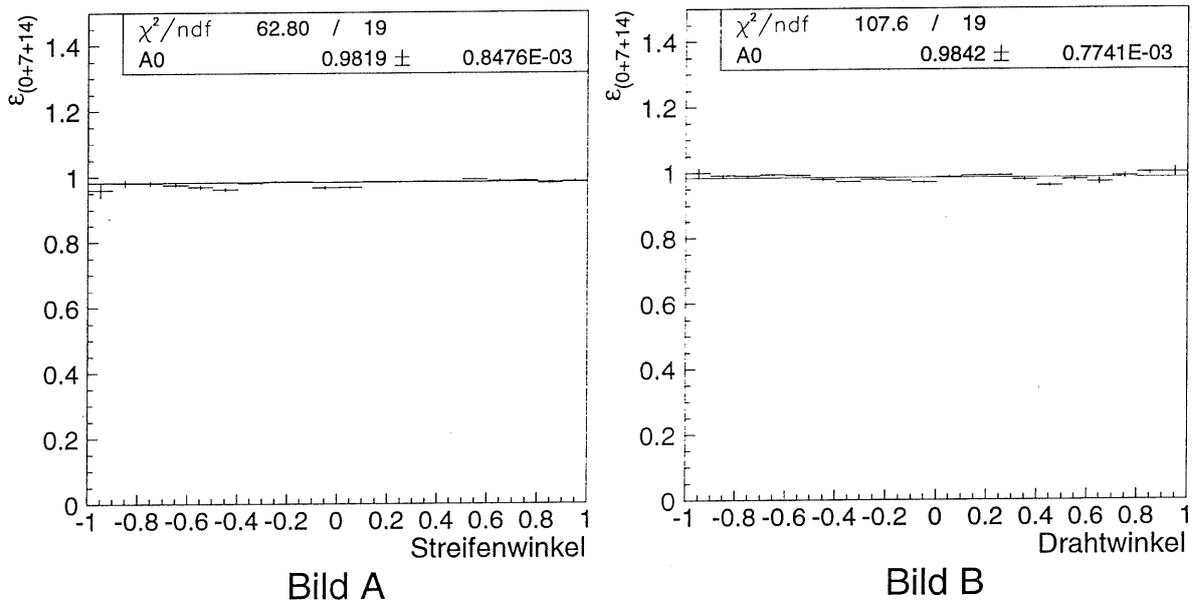


Abbildung 6.40: Abhängigkeit der Nachweiswahrscheinlichkeit der Streifenlagen von der Steigung *senkrecht zu den Streifen* (Bild A) und *senkrecht zu den Drähten* (Bild B)

Zusammenfassend läßt sich also feststellen, daß sich teilweise ganz erhebliche Unterschiede zwischen der bisherigen Monte-Carlo Simulation im Vergleich mit kosmischen Myonen und Strahl-Halo-Myonen ergeben haben:

- Entscheidend erweisen sich die Unterschiede in den Abhängigkeiten der Nachweiswahrscheinlichkeit der Drahtlagen zwischen Myonen aus der Monte-Carlo Simulation und realen Myonen, die wesentlichen Einfluß auf das Verständnis des H1-Detektors haben.
- Die in der Monte-Carlo Simulation angenommenen Abhängigkeit der Lagennachweiswahrscheinlichkeit von der Steigung *senkrecht zu den Streifen* ist bei den realen Daten nicht erkennbar.

- Die bei den realen Daten auftretende Abhängigkeit der Lagennachweiswahrscheinlichkeit von der Steigung *senkrecht zu den Drähten* wird in der bisherigen Monte–Carlo Simulation nicht korrekt reproduziert.
- Korreliert mit der nicht korrekt reproduzierten Abhängigkeit der Lagennachweiswahrscheinlichkeit von der Steigung *senkrecht zu den Drähten* ist eine zu große Winkelabhängigkeit vom Einfallswinkel *senkrecht zu den Drähten* bei der Drahtlagenmultiplizität.
- Ein weiterer Unterschied ist die Modulabhängigkeit der Lagennachweiswahrscheinlichkeit, die bei Monte–Carlo simulierten Myonen nicht auftritt; sehr wohl aber bei realen Daten erkennbar ist: bei der Nachweiswahrscheinlichkeit der Drahtlagen zum einen besonders gut sichtbar in den beiden Endkappen, bei der Nachweiswahrscheinlichkeit der Streifenlagen in einer deutlich geringeren Nachweiswahrscheinlichkeit bei einzelnen Modulnummern.

Kapitel 7

Zusammenfassung

Als Thema der vorliegenden Arbeit sollte die Winkel- und Impulsabhängigkeit der Lagennachweiswahrscheinlichkeit, d.h. der Wahrscheinlichkeit, ein minimalionisierendes Teilchen in einer bestimmten Lage des Myonsystems nachzuweisen, und der Multiplizität bei den Streamerrohren des zentralen Myondetektors des H1-Detektors bei HERA untersucht werden. Die Ergebnisse der Untersuchung mit realen Myonen sollten Myonen aus der Monte-Carlo Simulation gegenübergestellt werden, um so neue Erkenntnisse über den zentralen Myondetektor zu gewinnen.

Für die Bestimmung der Lagennachweiswahrscheinlichkeit war es notwendig, Korrekturen auf

- „noisy“ Drähte, also Drähte, die permanent ein Signal liefern,
- „tote“ Drähte, also Drähte, die aus technischen Gründen kein Signal geben können und
- nicht instrumentierte Bereiche

im zentralen Myondetektor durchzuführen.

Eine Abhängigkeit sowohl der Multiplizität als auch der Lagennachweiswahrscheinlichkeit vom Impuls der durch das instrumentierte Eisen gehenden minimalionisierenden Partikel (für Impulse kleiner als 10 GeV) konnte nicht nachgewiesen werden.

Bei den Untersuchungen betreffend der Multiplizität der Drahtlagen in Abhängigkeit vom Einfallswinkel *senkrecht zu den Drähten* tritt ein geometrischer Effekt auf, da mit größer werdendem Einfallswinkel mehr Drähte getroffen werden können. Mit dieser Winkelabhängigkeit ist eine Modulabhängigkeit der Drahtlagenmultiplizität korreliert.

Bei der Nachweiswahrscheinlichkeit der Drahtlagen kann man ausschließlich eine Winkelabhängigkeit vom Einfallswinkel *senkrecht zu den Drähten* konstatieren, die durch

die Ineffizienzen — verursacht durch die Wände zwischen den Streamerrohren — und durch eine minimale Spurlänge im aktiven Volumen der Streamerrohre (diese führt auch zu der Abhängigkeit der *Drahtlagenmultiplizität* vom Einfallswinkel *senkrecht zu den Drähten*) hervorgerufen wird.

Bei der Nachweiswahrscheinlichkeit der Streifenlagen konnte keine Winkelabhängigkeit festgestellt werden.

Sowohl bei den Draht- als auch bei den Streifenlagen tritt bei der Lagennachweiswahrscheinlichkeit eine Modulabhängigkeit auf: Bei den Drahtlagen ist diese besonders gut in einem kontinuierlichen Anstieg der Nachweiswahrscheinlichkeit in den beiden Endkappen mit der Modulnummer zu sehen. Bei den Streifenlagen haben einzelne Module eine auffallend geringe mittlere Nachweiswahrscheinlichkeit. Mögliche Erklärungen für diese Modulabhängigkeit liegen einerseits im Temperaturgradient des H1-Detektors, andererseits in der unterschiedlichen Gasqualität in den Modulen des instrumentierten Eisens.

Die mittlere Lagennachweiswahrscheinlichkeit ergibt sich zu

- ungefähr 80 % bei den Drahtlagen und zu
- nahezu 100 % bei den Streifenlagen — bei konditionierter Bestimmung der Nachweiswahrscheinlichkeit.

Mit Hilfe des erstellten Analyseprogrammes war es möglich, Fehler bei der Datennahme und der Funktionsweise der Streamerrohrkammern zu lokalisieren, die anschließend korrigiert werden konnten.

Vergleicht man die Ergebnisse der Untersuchungen von realen Myonen mit den Untersuchungen für Myonen aus der Monte-Carlo Simulation, so stellt man eine zu hohe Lagennachweiswahrscheinlichkeit in den simulierten Daten fest. Es läßt sich die in der Monte-Carlo Simulation angenommene Abhängigkeit von dem Einfallswinkel *senkrecht zu den Streifen* (die korreliert ist mit der zu hohen Lagennachweiswahrscheinlichkeit in den simulierten Daten) nicht mit den Untersuchungen von realen Myonen bestätigen. Die Abhängigkeit von dem Einfallswinkel *senkrecht zu den Drähten* bei kosmischen Myonen wird in der bisherigen Simulation nicht korrekt reproduziert.

Nach den vorgenommenen Korrekturen der Simulation (wenn man also die Lagennachweiswahrscheinlichkeit über die Drahtlagen bestimmt, eine Nachweiswahrscheinlichkeit ohne Wandeffekte von 85 % vorgibt, eine minimale Spurlänge im aktiven Volumen einer Streamerrohrzelle von 0,35 cm festlegt und die Wandbreite zwischen den Streamerrohrzellen auf den nominellen Wert setzt) konnten die kosmischen Myonen besser beschrieben werden.

Abbildungsverzeichnis

2.1	<i>Feynman-Graphen für die Photon-Gluon-Fusion</i>	4
2.2	<i>Feynman-Graphen für die J/ψ-Produktion</i>	4
2.3	<i>Feynman-Graphen für die Produktion von Myonpaaren durch die Photon-Photon-Kollision</i>	5
3.1	<i>Der Speicherring HERA und die Vorbeschleuniger</i>	6
3.2	<i>Der H1-Detektor</i>	9
3.3	<i>Das H1-Koordinatensystem</i>	10
3.4	<i>Das Spurkammersystem</i>	11
4.1	<i>Schematischer Aufbau einer Streamerrohrkammer</i>	15
4.2	<i>Die Unterteilung des zentralen Myondetektors</i>	17
4.3	<i>Die Struktur des instrumentierten Eisens</i>	18
5.1	<i>Definition des Einfallswinkels senkrecht zu den Streifen (θ) und senkrecht zu den Drähten (ϕ)</i>	26
6.1	<i>Lagen- und Modulabhängigkeit der Drahtlagenmultiplizität</i>	37
6.2	<i>Impulsabhängigkeit der Drahtlagenmultiplizität</i>	38
6.3	<i>Abhängigkeit der Drahtlagenmultiplizität von der Steigung senkrecht zu den Streifen (Bild A) und senkrecht zu den Drähten (Bild B)</i>	39
6.4	<i>Abhängigkeit der Streifenlagenmultiplizität von der Lagenummer (Bild A) und von der Modulnummer (Bild B)</i>	40
6.5	<i>Impulsabhängigkeit der Streifenlagenmultiplizität</i>	40
6.6	<i>Winkelabhängigkeit der Streifenlagenmultiplizität</i>	41

6.7	<i>Zeitabhängigkeit der Nachweiswahrscheinlichkeit der Drahtlagen</i>	42
6.8	<i>Modulabhängigkeit der Nachweiswahrscheinlichkeit der Drahtlagen</i>	43
6.9	<i>Modulabhängigkeit der Nachweiswahrscheinlichkeit der Drahtlagen nach hinterer (Bild A) und vorderer (Bild B) Endkappe getrennt</i>	44
6.10	<i>Abhängigkeit der Lagennachweiswahrscheinlichkeit von der Kanalnummer bei Modul 35 für die Drahtlage 6 (Bild A) und für die Drahtlage 7 (Bild B) — mit Schnitt in t_0</i>	45
6.11	<i>Abhängigkeit der Nachweiswahrscheinlichkeit von der Kanalnummer bei Modul 36 für die Drahtlage 6 (Bild A) und für die Drahtlage 7 (Bild B) — mit Schnitt in t_0</i>	45
6.12	<i>Impulsabhängigkeit der Nachweiswahrscheinlichkeit von Drahtlagen</i>	46
6.13	<i>Abhängigkeit der Nachweiswahrscheinlichkeit für Drahtlagen von der Steigung senkrecht zu den Streifen (Bild A) und von der Steigung senkrecht zu den Drähten (Bild B)</i>	47
6.14	<i>Zeitabhängigkeit der Nachweiswahrscheinlichkeit der Streifenlage 7</i>	48
6.15	<i>Modulabhängigkeit der Nachweiswahrscheinlichkeit der Streifenlage 0</i>	49
6.16	<i>Modulabhängigkeit der Nachweiswahrscheinlichkeit der Streifenlage 7 und der Streifenlage 14</i>	49
6.17	<i>Impulsabhängigkeit der Nachweiswahrscheinlichkeit bei der Streifenlage 7</i>	50
6.18	<i>Abhängigkeit der Nachweiswahrscheinlichkeit der Streifenlagen von der Steigung senkrecht zu den Streifen</i>	51
6.19	<i>Abhängigkeit der Nachweiswahrscheinlichkeit der Streifenlagen von der Steigung senkrecht zu den Drähten, getrennt für den Zentralbereich (Bild A) und für die Endkappen (Bild B)</i>	51
6.20	<i>Abhängigkeit der Nachweiswahrscheinlichkeit der Streifenlage 0 von der Modulnummer für den Auslesebus 16 (Bild A) und den Auslesebus 17 (Bild B)</i>	52
6.21	<i>Nachweiswahrscheinlichkeit der Streifenlage 0 in Abhängigkeit von $\cotan(\theta)$ — in Bild A ohne, in Bild B mit Korrekturen</i>	53
6.22	<i>Abhängigkeit der Nachweiswahrscheinlichkeit der Streifenlage 7 von t_0 bei Modul 25</i>	54
6.23	<i>Abhängigkeit der Nachweiswahrscheinlichkeit der Streifenlage 7 von den einzelnen Kanalnummern bei Modul 25</i>	55

6.24	Abhängigkeit der Nachweiswahrscheinlichkeit der Drahtlagen von der Streifenlagenmultiplizität	56
6.25	Winkelverteilung für Strahl-Halo-Myonen für die Steigung $\frac{dx}{dz}$ in Bild A und für die Steigung $\frac{dy}{dz}$ in Bild B	58
6.26	Abhängigkeit der Nachweiswahrscheinlichkeit der Drahtlagen von der Zeit t_0	59
6.27	Abhängigkeit der Nachweiswahrscheinlichkeit der Drahtlagen 6 und 7 von der Zeit t_0 , getrennt nach hinterer (Bild A) und vorderer Endkappe (Bild B)	59
6.28	Abhängigkeit der Nachweiswahrscheinlichkeit der Drahtlagen von der Modulnummer	60
6.29	Abhängigkeit der Nachweiswahrscheinlichkeit der Streifenlage 14 von der Zeit t_0 (Bild A) und von der Modulnummer (Bild B)	61
6.30	Abhängigkeit der Nachweiswahrscheinlichkeit der Drahtlagen von der Steigung senkrecht zu den Streifen (Bild A) und senkrecht zu den Drähten (Bild B)	62
6.31	Abhängigkeit der Drahtlagenmultiplizität von der Lagenummer (Bild A) und von der Modulnummer (Bild B)	64
6.32	Abhängigkeit der Drahtlagenmultiplizität vom Impuls	65
6.33	Abhängigkeit der Drahtlagenmultiplizität von der Steigung senkrecht zu den Streifen (Bild A) und senkrecht zu den Drähten (Bild B)	66
6.34	Abhängigkeit der Streifenlagenmultiplizität von der Steigung senkrecht zu den Streifen (Bild A) und senkrecht zu den Drähten (Bild B)	67
6.35	Abhängigkeit der Nachweiswahrscheinlichkeit der Drahtlagen von der Modulnummer (Bild A) und vom Impuls (Bild B)	68
6.36	Abhängigkeit der Nachweiswahrscheinlichkeit der Drahtlagen von der Steigung senkrecht zu den Streifen (Bild A) und senkrecht zu den Drähten (Bild B)	69
6.37	Querschnitt durch zwei nebeneinanderliegende Streamerrohrzellen	70
6.38	Abhängigkeit der Nachweiswahrscheinlichkeit und der Multiplizität der Drahtlagen von der Steigung senkrecht zu den Drähten für kosmische Myonen (Bild A) und für Myonen aus der Monte-Carlo Simulation (Bild B)	73
6.39	Abhängigkeit der Nachweiswahrscheinlichkeit der Streifenlage 14 von der Modulnummer (Bild A) und vom Impuls (Bild B)	74
6.40	Abhängigkeit der Nachweiswahrscheinlichkeit der Streifenlagen von der Steigung senkrecht zu den Streifen (Bild A) und senkrecht zu den Drähten (Bild B)	75

Tabellenverzeichnis

3.1	Die wichtigsten Kenndaten der Hadron-Elektron-Ring-Anlage (HERA)	8
5.1	Triggerwahrscheinlichkeiten ϵ_{trig} bei verschiedenen Lagennachweiswahrscheinlichkeiten ϵ	21
5.2	Definitionen der in dieser Arbeit relevanten Größen	24
5.3	Untersuchung der Nachweiswahrscheinlichkeit für Draht- und Streifenlagen — abhängig von Δd_{crit}	32
5.4	Definition der in den Formeln 5.16 bis 5.19 verwendeten Variablen	32
6.1	Parameter $\bar{\epsilon}$, y_0 , s_{min} und χ^2/ndf der Funktionen 6.4 bis 6.7 in der Abbildung 6.38	74

Literaturverzeichnis

- [Ald86] ALDRICH:
Katalog Handbuch Feinchemikalien / ALDRICH-CHEMIE GMBH & Co. KG
Steinheim: Selbstverlag, 1986
- [Ali91] ALI, A., WYLER, D.:
Heavy Quark Physics at HERA: Introduction and Overview / A. ALI, D. WYLER
Hamburg : Selbstverlag, 1991
(Physics at HERA, Vol. 2)
- [Ata82] ATAC, M. [ET AL.]:
Self-quenching Streamers / M. ATAC ET AL.
in: Nuclear Instruments & Methods, 1982, S.345–354
(A 200)
- [Blo87] BLOBEL, V.:
The BOS System — Dynamic Memory Management / V. BLOBEL
Hamburg, 1987
- [Bron87] BRONSTEIN, I.N., SEMENDJAJEW, K.A.:
Taschenbuch der Mathematik / I.N. BRONSTEIN, K.A. SEMENDJAJEW
Frankfurt: Harri Deutsch Verlag, 1987
- [CRC88] WEAST, R.C.:
CRC Handbook of Chemistry and Physics / R.C. WEAST
Boca Raton, Florida: CRC Press, Inc., 1988
- [Due94] DÜNGER, O.:
Untersuchung der Myonpaarerzeugung durch Photon-Photon-Kollision am e-p-Speicherring HERA / O. DÜNGER
Hamburg, 1994
(Dissertation)
- [Fel95] FELST, R.:
Persönliche Mitteilung / R. FELST
Hamburg, 1995

- [FH1K94] FH1K GRUPPE:
Das H1-Experiment bei HERA / FH1K GRUPPE
 Hamburg, [April] 1994
- [H1C93] H1 CALORIMETER GROUP:
The H1 Liquid Argon Calorimeter System / H1 CALORIMETER GROUP
 in: Nuclear Instruments & Methods, 1993, S.460–498
 (A 336)
- [H193] H1 COLLABORATION:
The H1 Detector at HERA / H1 COLLABORATION
 Hamburg, [Juli] 1993
- [H194] H1 COLLABORATION:
The H1 Detector at HERA / H1 COLLABORATION
 Hamburg, [Juli] 1994
 (ISSN 0418–9833)
- [H1J94] H1 COLLABORATION:
Photoproduktion of J/ψ -Mesons at HERA / H1 COLLABORATION
 Hamburg, [August] 1994
- [Her89] HERMA, R.:
Simulation von Myonen im H1-Detektor / R. HERMA
 Aachen, 1989
 (Diplomarbeit)
- [Iar83] IAROCCHI, E. [ET AL.]:
Plastic Streamer Tubes and their Applications in High Energy Physics / E. IAROCCHI ET AL.
 in: Nuclear Instruments & Methods, 1983, S.30–42
 (A 217)
- [Itt93] ITTERBECK, H.:
Untersuchungen am Myonsystem des H1-Detektors / H. ITTERBECK
 Aachen, 1993
 (Diplomarbeit)
- [Jun91] JUNG, H.:
The Monte-Carlo Generator EPJPSI for J/ψ -Mesons in High Energy Electron Proton Collisions / H. JUNG
 Hamburg, 1991
 (Proceedings of the HERA Workshop; 3)
- [Kas94] KASSELMANN, H.-P.:
Untersuchungen zur Messung von Elektronen mit dem elektromagnetischen Rückwärtskalorimeter (BEMC) des HERA H1-Detektors / H.-P. KASSELMANN
 Hamburg, 1994
 (DESY FH1K-94-07)

- [Kle92] KLEINWORT, C., KRÜGER, U.-P.:
Track Reconstruction in the Iron / C. KLEINWORT, U.-P. KRÜGER
 Hamburg, 1992
 (H1 Software Note; 35)
- [Kle95] KLEINWORT, C.:
Persönliche Mitteilung / C. KLEINWORT
 Hamburg, 1995
- [Koh85] KOHLRAUSCH, F.:
Praktische Physik 1 / F. KOHLRAUSCH
 Stuttgart: B.G.Stuttgart, 1985
 (23. Auflage)
- [Kra92] KRAMES, B.:
Untersuchungen zum Streamermechanismus und zur Optimierung der Betriebseigenschaften der H1-Müon-Kammern / B. KRAMES
 Aachen, 1992
 (Diplomarbeit)
- [Kru94] KRÜGER, U.-P.:
Untersuchung der Erzeugung schwerer Quarks durch ihren Zerfall in Myonen im H1-Detektor bei HERA / U.-P. KRÜGER
 Hamburg, 1994
 (DESY F11/F22-94-02)
- [Kuc88] KUCHLING, H.:
Taschenbuch der Physik / H. KUCHLING
 Frankfurt/Main: Harri Deutsch Verlag, 1988
- [Mey91] MEYER, J.:
Guide to Simulation Program H1SIM / J. MEYER
 Hamburg, 1991
- [PDG92] PARTICLE DATA GROUP:
Review of Particle Properties / PARTICLE DATA GROUP
 in: *Physical Review*, 1992. S.1-584
 (D45, Bo 11, Part II)
- [Per90] PERKINS, D.H.:
Introduction to High Energy Physics / D.H. PERKINS
 London: Addison-Wesley Publishing Company, 1990
- [Sch90] SCHMÜSER, P.:
Zur Fertigstellung von HERA / P. SCHMÜSER
 in: *Physikalische Blätter*, [Dez] 1990, S.470-477
 (Band 46, Nr.12)

[Smi93] SCHMIDT, C.:

Untersuchung der Photoproduktion von J/ψ -Mesonen durch Myonnachweis am $e-p$ -Speicherring HERA / C. SCHMIDT
Hamburg, 1993
(Dissertation)

[Tof79] TØFTE, H.:

Probability and Statistics in Particle Physics / H. TØFTE
Bergen: Universitetsforlaget, 1979

[Tut91] TUTAS, J.:

Myonen im H1-Detektor / J. TUTAS
Aachen, 1991
(Dissertation)

[Zit92] ZITZEN, S.:

Untersuchungen zum Streamermoden von Gasentladungsdetektoren, Entwicklung und Überprüfung eines numerischen Modells zur quantitativen Beschreibung von Gasentladungsdetektoren / S. ZITZEN
Aachen, 1992
(Dissertation)

Danksagung

Bei allen Mitgliedern der H1-Myongruppe, in der diese Diplomarbeit entstanden ist, möchte ich mich für die gute Zusammenarbeit, die angenehme Arbeitsatmosphäre und die unzähligen Gespräche bedanken.

Mein spezieller Dank gilt Herrn DR. KLEINWORT für die gute Betreuung und seine freundliche Unterstützung. Seine konstruktiven Vorschläge trugen wesentlich zum Gelingen dieser Arbeit bei.

Bei Frau PROF. DR. NAROSKA, die mir diese Diplomarbeit in der H1-Kollaboration ermöglicht hat, möchte ich mich für die interessante Aufgabenstellung bedanken. Herrn PROF. DR. FELST danke ich für die Begutachtung der Diplomarbeit.

Meinen Eltern danke ich dafür, daß sie mir mein Studium ermöglicht haben und schließlich möchte ich mich noch bei meiner Freundin für die unermüdliche und geduldige Unterstützung während der Entstehung meiner Diplomarbeit bedanken.

Ich versichere, diese Arbeit unter Angabe aller wesentlichen Hilfsmittel und Quellen selbständig angefertigt zu haben.

Hamburg, den 22.3.1935