

PITHA

93/28

Untersuchungen am Myonsystem
des H1-Detektors

(Bestimmung der Nachweiswahrscheinlichkeit
von Myonen in den H1-Myonkammern)

von

Heiko Itterbeck

PHYSIKALISCHE INSTITUTE
RWTH AACHEN
Sommerfeldstr.
51 AACHEN, FR GERMANY

Untersuchungen am Myonsystem des H1-Detektors

(Bestimmung der Nachweiswahrscheinlichkeit
von Myonen in den H1-Myonkammern)

von

Heiko Itterbeck

Diplomarbeit in Physik
vorgelegt der

Mathematisch-Naturwissenschaftlichen Fakultät der
Rheinisch-Westfälischen Technischen Hochschule Aachen

im Februar 1993

angefertigt im
I. Physikalischen Institut

Inhaltsverzeichnis

Einführung	3
1 Der Speicherring HERA	5
2 Physik bei HERA	9
2.1 Produktion schwerer Quarks	9
2.2 Myon-Paarproduktion bei $\gamma\gamma$ -Kollisionen	11
2.3 Produktion angeregter Fermionen	11
2.4 Produktion von W -Bosonen	12
3 Der H1-Detektor	15
3.1 Das Spurkammersystem	15
3.2 Das Kalorimetersystem	17
3.3 Die supraleitende Spule	18
3.4 Das Myonspektrometer in Vorwärtsrichtung	19
3.5 Das Instrumentierte Eisen und die Myonlagen	19
3.6 Trigger und Datenfluß bei H1	19
4 Das H1-Myonnachweissystem	23
4.1 Die Streamerrohr-Kammern	23
4.1.1 Aufbau	23
4.1.2 Funktionsweise	24
4.2 Einteilung und Instrumentierung	25
4.2.1 Subdetektoren	25
4.2.2 Module	25
4.2.3 Instrumentierung der Module	25
4.3 Gas- und Hochspannungsversorgung	28
4.4 Auslese	30
4.4.1 Das STS als Triggerelement	30
4.4.2 Das STS in der Spurrekonstruktion	31
4.4.3 Das STS als Kalorimeter-Tailcatcher	31
5 Vorüberlegungen	33
5.1 Motivation	33
5.2 Problematik	33
5.3 Definitionen	34

5.3.1	Lagennachweiswahrscheinlichkeit	34
5.3.2	Streamerwahrscheinlichkeit	34
5.4	Winkelabhängigkeit von ϵ_{lay}	35
5.5	Voraussetzungen	38
5.6	Der Myon-Kalibrationstrigger	39
5.7	Multiplizitäten	40
5.8	Systematische Fehler der Nachweiswahrscheinlichkeit der Triggerlagen . . .	42
6	Das Analysepaket IWILEF	47
6.1	Die Philosophie	48
6.2	Die Realisierung	49
6.2.1	Spurerkennung	49
6.2.2	Spurrekonstruktion	52
7	Ergebnisse der Untersuchungen	57
7.1	Programmtest mit simulierten Daten	57
7.2	Erste Bestimmung der mittleren Nachweiswahrscheinlichkeit der Lagen aller Module	58
7.3	Korrektur der lokalen Geometrie	60
7.4	Abhängigkeit der Nachweiswahrscheinlichkeit von der Hochspannung . . .	60
7.5	Rückschlüsse von der Nachweiswahrscheinlichkeit auf Gasqualität und Hochspannung	63
7.6	Abschließende Bestimmung der mittleren Nachweiswahrscheinlichkeit der Lagen aller Module	64
7.7	Zusammenfassung	69
8	Benutzung des Programmes IWILEF	71
	Verzeichnis der Literatur	77

Einführung

Nach fast 2500 Jahren menschlicher Suche nach den kleinsten, die Welt konstituierenden, elementaren Teilchen und ihren Wechselwirkungen, sagt heute das Standardmodell der Hochenergiephysik, alle Materie baue sich aus zwölf fundamentalen Fermionen und ihren Antiteilchen auf:

den nur elektroschwach wechselwirkenden Leptonen $\nu_e, e^-, \nu_\mu, \mu^-, \nu_\tau, \tau^-$
 und den zusätzlich stark wechselwirkenden Quarks u, d, c, s, t, b .

und erklärt die Phänomene der schwachen, der elektromagnetischen und der starken Wechselwirkung zwischen ihnen durch Austausch von Eichbosonen [1]

$$Z^0, W^\pm, \gamma, g.$$

Um die Vorhersagen des Standardmodells zu untersuchen, es also zu stützen aber auch möglicherweise fundamental in Frage zu stellen, wurden in den letzten zwei Jahrzehnten in zahlreichen Beschleunigerexperimenten mit internationaler Beteiligung mit immer größeren Schwerpunktsenergien \sqrt{s} Leptonen (e^+e^-) bzw. Hadronen ($p\bar{p}$) zur Kollision gebracht.

Bisherige Experimente der Hochenergiephysik

Name(Laboratorium)	Teilchen	Schwerpunktsenergie	Start
SPEAR(SLAC)	e^+e^-	8 GeV	1972
DORIS(DESY)	e^+e^-	11 GeV	1973
PETRA(DESY)	e^+e^-	47 GeV	1978
CESR(Cornell)	e^+e^-	12 GeV	1979
PEP(SLAC)	e^+e^-	30 GeV	1980
TRISTAN(KEK)	e^+e^-	64 GeV	1987
SLC(SLAC)	e^+e^-	100 GeV	1988
LEP(CERN)	e^+e^-	110 GeV	1989
SppS(CERN)	$p\bar{p}$	0.6 TeV	1981
TEVATRON(Fermilab)	$p\bar{p}$	2 TeV	1987

Auf diese Weise konnte aber z.B. bis heute die Existenz des ν_τ und des t -Quarks nicht nachgewiesen werden, auch ist das Wissen um die Strukturfunktionen des Protons bei hohen Energien praktisch noch unbekannt. Außerdem werden mittlerweile von Theorien jenseits des Standardmodells supersymmetrische Teilchen oder Leptoquarks und angeregte Leptonen vorhergesagt, deren Existenz als Indiz einer Substruktur der Leptonen und Quarks gedeutet würde.

Vor diesem Hintergrund wurde 1984 am Deutschen-Elektronen-Synchrotron (DESY) in Hamburg mit dem Bau eines Elektron-Proton-Speicherringes begonnen, der Hadron-Elektron-Ring-Anlage HERA. Seit dem 31.Mai 1992 werden hier erstmals Elektronen mit einer Energie $E_e = 26.7\text{GeV}$ und Protonen mit $E_p = 820\text{GeV}$ zur Kollision gebracht.

Bezeichnet man die Viererimpulse des Elektrons und des Protons mit p_e und p_p , entspricht dies bei Vernachlässigung der Teilchenruhemassen einer Schwerpunktsenergie von

$$\sqrt{s} := \|p_e + p_p\| \approx \sqrt{4E_e E_p} \approx 296 \text{ GeV}$$

und bedeutet eine Erweiterung des Impulsübertragsbereiches, für den die Strukturfunktionen bereits gemessen wurden, um fast vier Größenordnungen bis zu Impulsüberträgen $Q^2 \sim 10^5 \text{ GeV}^2$ bzw. hinunter bis zu Bjorkenvariablen x im Bereich 10^{-2} bis 10^{-4} . So verspricht HERA einerseits, einen enorm aussagekräftigen Beitrag zu Theorie und Phänomenologie der starken Wechselwirkung zu leisten.

Auf der anderen Seite erhofft man sich bei einer räumlichen Auflösung der Größenordnung 10^{-18} m erste Aufschlüsse über weitere Substrukturen, z.B. der Leptonen, deren Entdeckung das Standardmodell in Frage stellen.

Um diese Erwartungen zu erfüllen, wurden in aus früheren Experimenten bewährter Schalenbauweise, nach unterschiedlichen Konzepten die Großdetektoren H1 und ZEUS installiert.

Vorliegende in der H1-Kollaboration entstandene Arbeit untersucht das H1-Myonnachweissystem. Ihm kommt aufgrund der erwarteten Physik einerseits (Kapitel 2) und seiner Multifunktionalität bei H1 (Trigger, Kalorimeter-Tailcatcher, Tracking) (Kapitel 3/4) andererseits eine besondere Bedeutung zu. Dies motiviert die Entwicklung eines Algorithmus (Kapitel 5/6) mit dessen Hilfe die Leistungsfähigkeit des Systems, insbesondere die Nachweiswahrscheinlichkeit für Myonen bestimmt werden kann.

Anmerkung: Da sich in den vergangenen fünf Jahrzehnten die englische Sprache als die der Physik entwickelt hat, sind auch in einem in deutsch verfaßten Papier Anglizismen unvermeidbar. Soweit sie dem Leser nicht als bekannt unterstellt werden, geht ihre Bedeutung zumindest bei ihrem ersten Auftreten unmittelbar aus dem Zusammenhang hervor.

Kapitel 1

Der Speicherring HERA

Der Speicherring HERA erstreckt sich in seiner gesamten Länge von ca. 6.3 km in 10-25m Tiefe unter der Erdoberfläche im Nordwesten Hamburgs. In ihm werden aktuell 820 GeV Protonen und 26.7 GeV Elektronen gespeichert, die in zwei von drei Wechselwirkungs-zonen zur Kollision gebracht werden können: im H1-Detektor in Halle Nord, und im ZEUS-Detektor in Halle Süd. Zur Vorbeschleunigung dient dabei fast die gesamte, zum Teil modifizierte Beschleunigerausstattung des Deutschen-Elektronen-Synchrotrons (DESY) aus bisherigen Experimenten (Abbildung 1.1). Die Elektronen werden nach ihrer Erzeugung

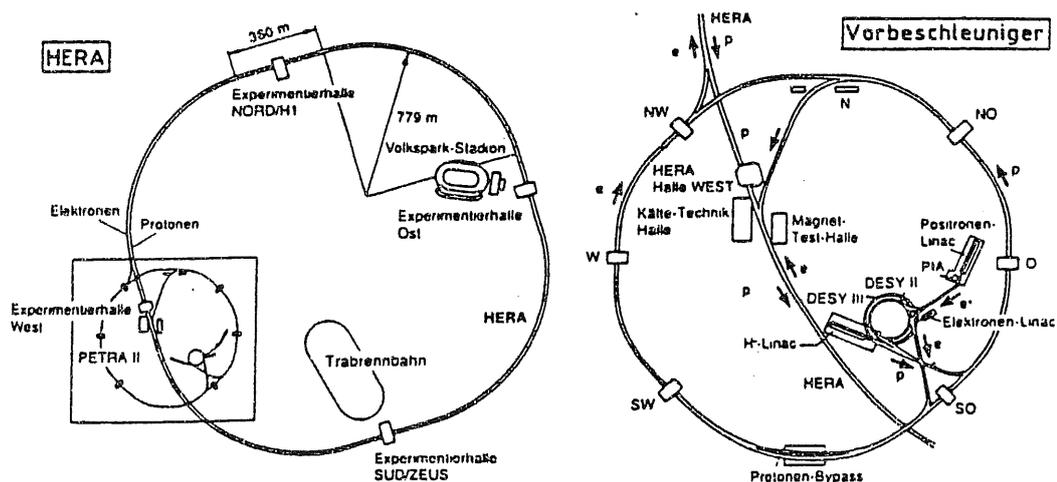


Abbildung 1.1: Der Speicherring HERA beim DESY

im Linearbeschleuniger LINAC II im (ehemaligen) Positronen-Intensitäts-Akkumulator PIA zwischengespeichert, der die Aufgabe hat, sie zu Paketen, sog. *Bunches*, zu komprimieren, deren Struktur es erst erlaubt, sie in hochfrequenten elektrischen Wechselfeldern weiter zu beschleunigen. Nach der Weiterbeschleunigung in den Synchrotrons DESY II und PETRA II werden diese Elektronbunches dann mit einer Energie von 14 GeV in HERA injiziert.

Die Protonen entstehen aus im neubauten LINAC III vorbeschleunigten H^- -Ionen, die

bei Injektion in DESY III ionisiert und dort und in PETRA II als Protonen weiterbeschleunigt werden. Bei einer Energie von 40 GeV gelangen sie dann in den Speicherring HERA. Die wichtigsten Daten der Vorbeschleuniger sind nocheinmal in den Tabellen 1.1 festgehalten.

Bei der Realisierung der letzten Beschleunigungsstufe in HERA wurden technologisch

Tabelle 1.1: Elektronen- und Protonenvorbeschleunigung

Name	in Betrieb seit	Länge/ Umfang	E_{max}	Name	in Betrieb seit	Länge/ Umfang	E_{max}
LINAC II	1969	70 m	450 MeV	LINAC III	1988	32 m	50 MeV
PIA	1979	29 m	450 MeV	DESY III	1989	317 m	8 GeV
DESY II	1986	300 m	7 GeV	PETRA II	1989	2301 m	40 GeV
PETRA II	1978	2300 m	14 GeV				

u.a. aus Kostengründen ganz neue Wege beschritten: während zur Erzeugung des im Elektronenring notwendigen Magnetfeldes von $0.27 T$ noch konventionelle Technik Anwendung fand, wurde der Protonbeschleunigungsring erstmals vollständig mit supraleitenden Magneten ausgestattet, die bei einer Temperatur von $4.4 K$ eine magnetische Flußdichte von $4.7 T$ erzeugen. Die hierfür benötigte Kälteanlage hat eine Leistungsaufnahme von ca. $6 MW$. Zum Vergleich: im SppS im CERN werden zur Proton-Antiproton-Speicherung bei $315 GeV$ mit normaleitenden Magneten bereits $52 MW$ verbraucht.

Es ist geplant, in HERA je 210 Elektron- und Protonbunches zu speichern und dann mit einer Frequenz von ca. $10 MHz$ in den Detektoren H1 und ZEUS zur Kollision zu bringen. Es wird eine Luminosität von $\mathcal{L} = 1.5 \times 10^{31} cm^{-2} s^{-1}$ bzw. ca. $100 pb^{-1}/a$ erwartet, bei der Reaktionen mit Wirkungsquerschnitten σ eine Ereignisrate R besitzen, die gegeben ist durch

$$R = \mathcal{L} \cdot \sigma$$

Das bedeutet, man erwartet für Reaktionen mit einem Wirkungsquerschnitt von $\sigma = 1 pb$ ungefähr 100 Ereignisse pro Jahr. Die wichtigsten Einzelheiten von HERA sind nocheinmal in Tabelle 1.2 [3] zusammengefaßt.

Tabelle 1.2: Die wichtigsten Kenndaten der Hadron-Elektron-Ringanlage HERA

Allgemeines		
Bauzeit	Mai 1984–November 1990	
Kosten der Anlage	1.010 Mrd. DM	
Zahl der beteiligten Staaten	12	
Inbetriebnahme	Oktober 1991	
Tunnel		
Umfang	6336 m	
Tiefe unter Straßenniveau	10-25 m	
Dicke der Tunnelwände	30 cm	
Innendurchmesser	5.2 m	
Zahl der Vorbeschleuniger	6	
Experimentierhallen		
Zahl	4	
Größe	25 × 43 × ca.25m ³	
Experimente (1. Ausbaustufe)	H1 & ZEUS	
Kosten der beiden Experimente	ca.200 Mio. DM	
Zahl der beteiligten Staaten	17	
Inbetriebnahme	April 1991	
Zahl der Wechselwirkungszonen	3	
Strahleigenschaften		
	Elektronenring	Protonenring
Maximalenergie	30 GeV (26.7 GeV)	820 GeV
Schwerpunktsenergie	314 GeV (296 GeV)	
Einschußenergie	14 GeV	40 GeV
Luminosität	1.5 × 10 ³¹ cm ⁻² s ⁻¹	
Teilchenstrom	60 mA (~ 2 mA)	160 mA (~ 2 mA)
Teilchen pro Bunch	3.5 × 10 ¹⁰	10 ¹¹
Zahl der Bunches im Ring	210 (10)	210 (10)
Bunchlänge	30 mm	440 mm
Bunchabstand	28.8 m bzw. 96 ns	
Strahlbreite in den WW-Punkten	0.264 mm	0.300 mm
Strahlhöhe in den WW-Punkten	0.017 mm	0.095 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	4.68 T
Zahl der konventionellen HF-Resonatoren	82	2
Zahl der supraleitenden HF-Resonatoren	16	—
Frequenz der HF-Resonatoren	500 MHz	52 MHz

Kapitel 2

Physik bei HERA

Das physikalische Programm bei HERA als Elektron-Proton-Speicherring mit diesen bisher nicht erreichten Energien ist breit gefächert. Im folgenden seien aber nur die Reaktionen mit Myonen im Endzustand näher erläutert, für deren Untersuchung ein leistungsstarkes Myonnachweissystem wünschenswert, ja z.T. notwendig ist, und so eine genauere Untersuchung dieses Detektorteils motivieren.

Erstes Objekt der physikalischen Forschung bei HERA ist in Fortsetzung der sog. *Fixed-Target-Experimente* natürlich die Elektron-Proton-Streuung. Je nach Ladung des dabei ausgetauschten Bosons unterscheidet man Wechselwirkungen des neutralen Stroms (γ, Z^0) und des geladenen Stroms (W^\pm). Bis auf Zerfallsmyonen der zu Hadronen fragmentierenden Quarks ist dieser Prozeß aber uninteressant im Hinblick auf Untersuchbarkeit mit einem Myonnachweissystem.

2.1 Produktion schwerer Quarks

Die Produktion schwerer $c\bar{c}$ - und $b\bar{b}$ -Quarkpaare (und damit auch ihrer zugehörigen Mesonen $\eta_c, J/\psi, X_c, \psi, \Upsilon, X_b \dots$) wird absolut dominiert durch den Prozeß der Photon-Gluon-Fusion [4]. Abbildung 2.1 zeigt den Graphen der Reaktion: durch Fusion eines Bremsstrahlungsphotons des Elektrons mit einem Bremsstrahlungsgluon des Protons werden Quark-Antiquark-Paare erzeugt. Bei Impulsüberträgen $0 < Q^2 < 100 \text{ GeV}^2$ betragen die Wirkungsquerschnitte für die Produktion von $c\bar{c}$ - und $b\bar{b}$ -Paaren ungefähr [6]:

$$\sigma_{b\bar{b}} \approx 4.2 \mu\text{b} \qquad \sigma_{c\bar{c}} \approx 350 \mu\text{b} .$$

Man erwartet bei einer integrierten Luminosität von 100 pb^{-1} also ca. $4.2 \cdot 10^8$ $b\bar{b}$ - und $3.5 \cdot 10^{10}$ $c\bar{c}$ -Ereignisse. Der Großteil der Energie geht bei diesen Reaktionen in Protonrichtung, wo eine exakte Kalorimetrie sehr schwierig ist. Die b - und c -Quarks zerfallen hauptsächlich schwach gemäß

$$b \rightarrow W^- c \qquad \bar{b} \rightarrow W^+ \bar{c} \qquad c \rightarrow W^+ s \qquad \bar{c} \rightarrow W^- \bar{s} .$$

Die W^\pm -Bosonen zerfallen ihrerseits mit einer partiellen Breite von 10.5% in Myonen [2]:

$$W^+ \rightarrow \mu^+ \nu_\mu \qquad W^- \rightarrow \mu^- \bar{\nu}_\mu .$$

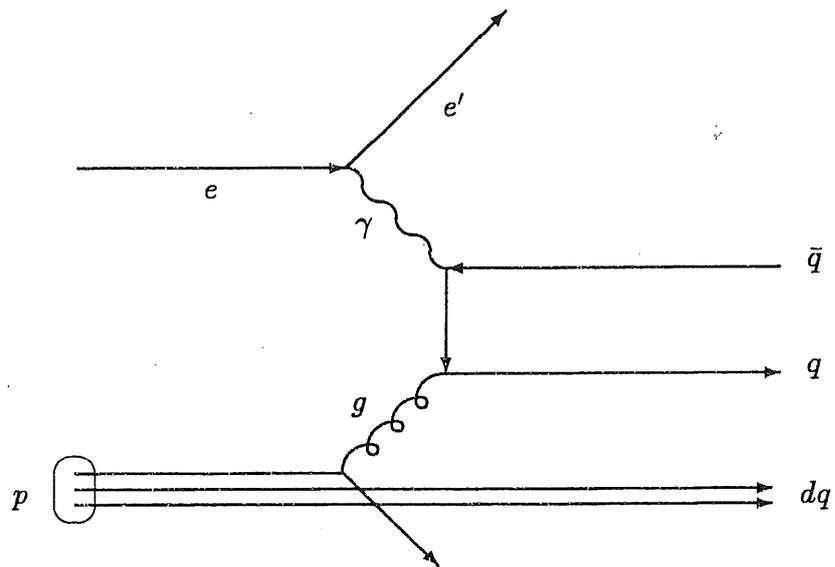


Abbildung 2.1: Feynman-Graph der Quark-Antiquark-Produktion durch γg -Fusion

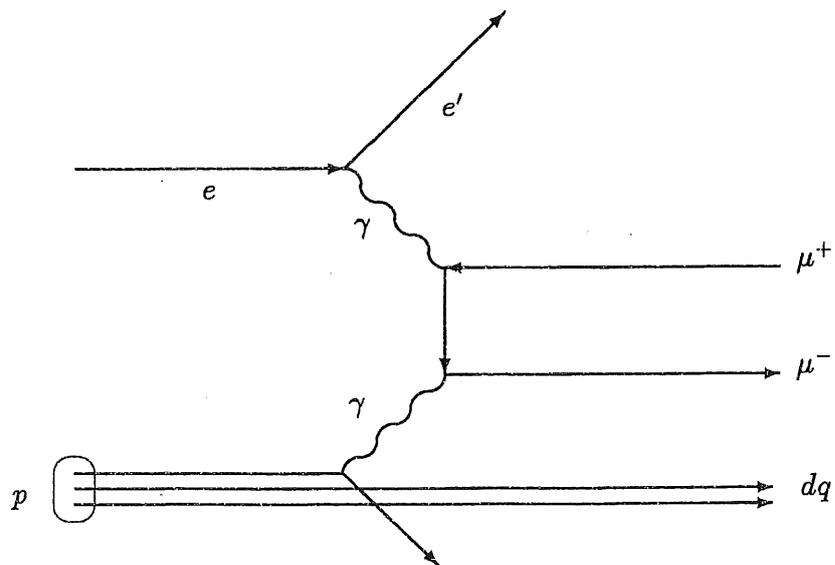


Abbildung 2.2: Feynman-Graph der Annihilation zweier Bremsstrahlungspotonen in zwei Myonen

Somit sind aus einem b -Zerfall maximal vier Myonen zu erwarten und damit können diese Reaktionen auch mit einem Myondetektor genauer untersucht werden. Da die b -Quarkmasse mit ca. 5 GeV gut dreimal so groß ist wie die des c -Quarks, ist eine Bestimmung der Herkunft der Myonen nämlich über deren Transversalenergie $E_{t,\mu}$ möglich [6]

2.2 Myon-Paarproduktion bei $\gamma\gamma$ -Kollisionen

Strahlt das Proton in Analogie zur Produktion schwerer Quarkpaare durch γg -Fusion statt eines Gluons ein Photon ab, so können diese beiden Photonen in ein Fermion-Antifermion-Paar fusionieren (Abbildung 2.2). Dieser Prozeß trägt zwar ebenfalls zur $q\bar{q}$ -Produktion bei, ist aber neben der γg -Fusion vernachlässigbar. Simulationsrechnungen [6] liefern bei Schnitten auf die Streuwinkel von Elektron und Proton und Forderung eines Mindest-Transversalimpulses $p_{t,\mu} \geq 0.1 \text{ GeV}$ einen totalen Wirkungsquerschnitt $\sigma \approx 830 \text{ pb}$. Stellt man weiterhin an die beiden erzeugten Myonen die Bedingungen $E_\mu \geq 2.5 \text{ GeV}$ und $5^\circ \geq \vartheta_\mu \geq 175^\circ$, erwartet man bei HERA pro Jahr ca. 23000 Ereignisse dieser Art.

2.3 Produktion angeregter Fermionen

Ein mögliches Indiz für eine Substruktur der vom Standardmodell elementar angenommenen Fermionen wäre die Beobachtung angeregter Zustände. Die Produktion angeregter Leptonen bei HERA zu wird in [4][5] ausführlich diskutiert. Die Produktion angeregter Elektronen wird durch den Feynman-Graphen 2.3 beschrieben (inelastischer Fall): Elektron und Proton tauschen ein Boson (i.a.: ein Photon) aus, wobei das Proton zerstört und ein angeregtes Fermion erzeugt wird. Der totale Wirkungsquerschnitt der e^* -Produktion

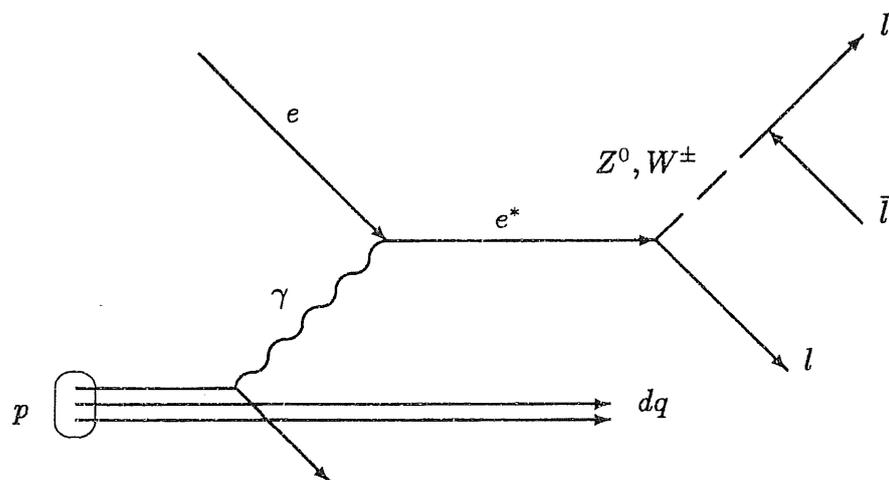


Abbildung 2.3: Feynman-Graph der Produktion angeregter Elektronen

durch Photonaustausch, der sich zu etwa gleichen Teilen aus dem elastischen und dem inelastischen Prozeß zusammensetzt, beträgt für eine e^* -Masse m_{e^*} von 100 GeV und einer Kopplungsskala $\Lambda = 1 \text{ TeV}$ ca. 0.7 pb [7], d.h. man erwartet selbst bei Erreichen einer integrierten Luminosität von $100 \text{ pb}^{-1}/a$ nur 70 e^* -Ereignisse pro Jahr.

Diese angeregten Elektronen zerfallen wie folgt:

Zerfallsreaktion	$\Gamma_i/\Gamma(m_{e^*} = 100 \text{ GeV})$
$e^* \rightarrow e^- \gamma$	71.9%
$e^* \rightarrow e^- Z^0$	1.3%
$e^* \rightarrow \nu_e W^-$	26.8%

Je höher allerdings die Masse m_{e^*} , umso größer sind die partiellen Breiten Γ_i/Γ der Zerfallskanäle $e^* \rightarrow e^- Z^0$ und $e^* \rightarrow \nu_e W^-$, daher ist auch ein Nachweis in diesen Kanälen wichtig. Da die Eichbosonen der schwachen Wechselwirkung Z^0 und W^- mit bereits oben erwähnten relativen Breiten in Myonen zerfallen, erwartet man nur relativ wenig Myonen aus e^* -Zerfällen, was ein hochsensitives Myonsystem wünschenswert macht.

2.4 Produktion von W -Bosonen

Eine weitere interessante Möglichkeit der Untersuchung des Standardmodells bei HERA bietet der Prozeß der Erzeugung freier W -Bosonen gemäß $e p \rightarrow e' W X$ [4][8], im besonderen jener Teilprozeß mit der Wechselwirkung zweier W -Bosonen und einem Z^0 oder γ . Den Graphen dieser speziellen Teilreaktion zur Erzeugung freier W -Bosonen zeigt Abbildung 2.4. Das dabei entstehende freie W zerfällt dann in ein Fermion-Antifermion-Paar, im speziellen in ein Myon und ein Neutrino, was ein sensibles Myonsystem für diese Reaktion wiederum interessant macht. Die Wirkungsquerschnitte der Reaktionen

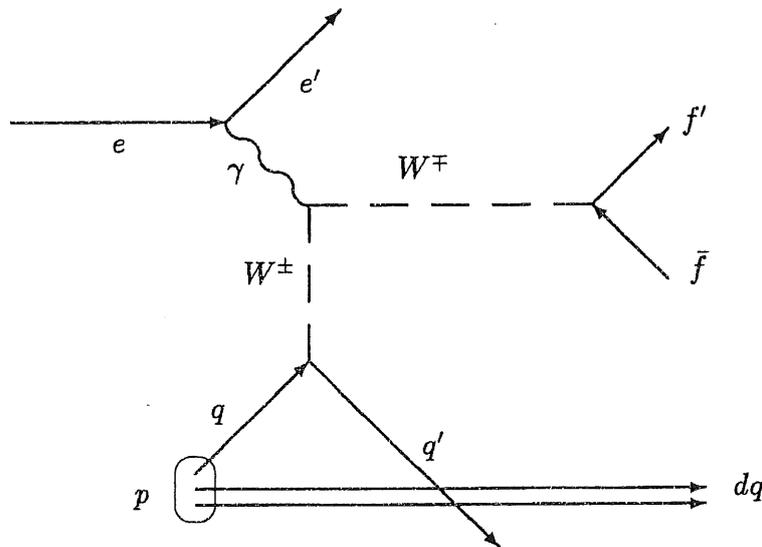


Abbildung 2.4: Feynman-Graph der W -Boson-Produktion mit Drei-Boson-Vertex

$e p \rightarrow e' W^\pm X$ wurden in Abhängigkeit verschiedener Schnitte zu $0.48 < \sigma_{tot} < 1.32 pb$ berechnet [8]. Hier werden also pro Jahr nur etwa 10 – 40 Myonen erwartet.

Um *alle* bei HERA erwarteten Reaktionen möglichst optimal untersuchen zu können, wurden mit großem technischen Aufwand die Vielkomponenten-Detektoren ZEUS und H1 in zwei der drei Wechselwirkungszonen installiert.

Im folgenden Kapitel wird der Detektor der H1-Kollaboration beschrieben, in der diese Arbeit entstand.

Kapitel 3

Der H1-Detektor

Im Gegensatz zu vorangegangenen Experimenten, in denen e^+e^- bzw. $p\bar{p}$ gleicher Energie zur Kollision gebracht wurden, ist der H1-Detektor asymmetrisch bezüglich der Ebene senkrecht zum Strahl durch den Wechselwirkungspunkt, was die höhere Energie des Protons und damit die zu erwartende höhere Intensität der Reaktionsprodukte in Vorwärtsrichtung berücksichtigt. Abbildung 3.2 zeigt einen Schnitt durch den Detektor längs der Strahlachse und das H1-Koordinatensystem. Die einzelnen Komponenten von innen nach außen werden in folgenden Abschnitten vorgestellt[10][11]; die dabei auftretenden Nummern \boxed{n} beziehen sich auf Abbildung 3.2.

3.1 Das Spurkammersystem

Das H1-Spurkammersystem gruppiert sich in einem zentralen $\boxed{2}$ (s. Abb. 3.2), einem Vorwärts- $\boxed{3}$ und einem Rückwärtsbereich direkt um den Wechselwirkungspunkt (Abbildung 3.1). Die Zentrale Spurkammer besteht aus zwei Jetkammern (CJC1, CJC2) zur

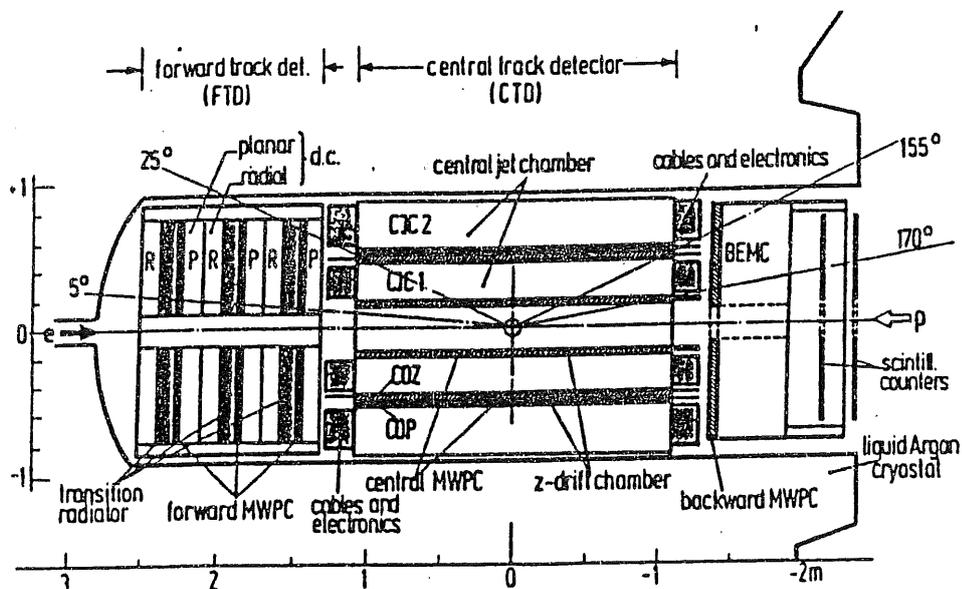
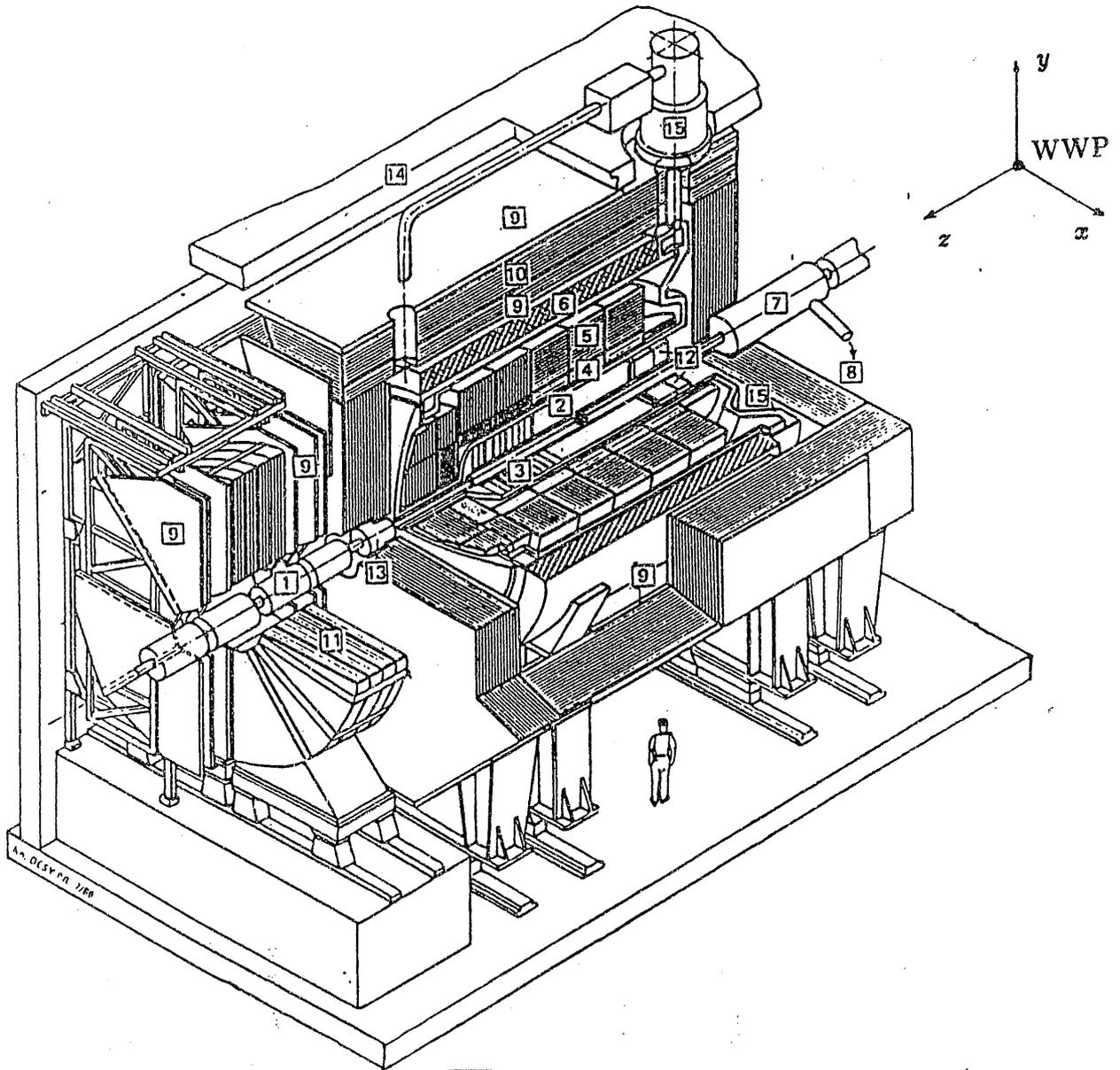


Abbildung 3.1: Das H1-Spurkammersystem

Abbildung 3.2: Der H1-Detektor



- | | | | |
|---|--|----|--|
| 1 | Strahlrohr mit Magneten | 9 | Myonkammern (Streamerrohrkammern) |
| 2 | Zentrale Spurkammer | 10 | Instrumentiertes Eisen
(Eisenplatten und Streamerrohrkammern) |
| 3 | Vorwärtspurkammern
und Übergangsstrahlungsmodul | 11 | Myon-Toroid-Magnet |
| 4 | Elektromagnetisches Kalorimeter | 12 | Warmes el.-magn. Kalorimeter (BEMC) |
| 5 | Hadronisches Kalorimeter | 13 | Vorwärts-Kalorimeter (Plug-) |
| 6 | Supraleitende Spule | 14 | Beton-Abschirmung |
| 7 | Kompensationsmagnet | 15 | LAr-Kryostat |
| 8 | He-Kälteanlage | | |

Bestimmung der r - φ -Komponente, Driftkammern zur Bestimmung der z -Komponente der Spur geladener Teilchen (CIZ, COZ) und zwei zylindrischen Vieldrahtproportionalkammern (CIP, COP).

Der Vorwärtsbereich ist mit drei aufeinanderfolgenden identischen Lagen aus folgenden Nachweissystemen bestückt: planaren Driftkammern zur ϑ -Bestimmung, Vieldrahtproportionalkammern (MWPC), Übergangsstrahlungsdetektoren zur Lepton-Hadron-Unterscheidung und radialen Driftkammern zur Messung des Azimuthwinkels φ .

Im rückwärtigen Bereich befindet sich eine weitere Vieldrahtproportionalkammer, die im Gegensatz zu den bisher genannten im wesentlichen nicht Triggerzwecken sondern der Elektronerkennung dient.

3.2 Das Kalorimetersystem

Die Spurkammern werden vom Herzstück des Kalorimetersystems umschlossen, dem Flüssig-Argon-Kalorimeter (im folgenden LAr-Kalorimeter genannt), das aus vielen Schichten Absorbermaterial und Ionisationskammern als Nachweiselement besteht. Es ist eingebettet in den Kryostaten [15], der das flüssige Argon enthält, und besteht aus acht Rädern, sog. *Wheels*, die sich entlang der Strahlachse aufreihen. Diese Räder sind wie-

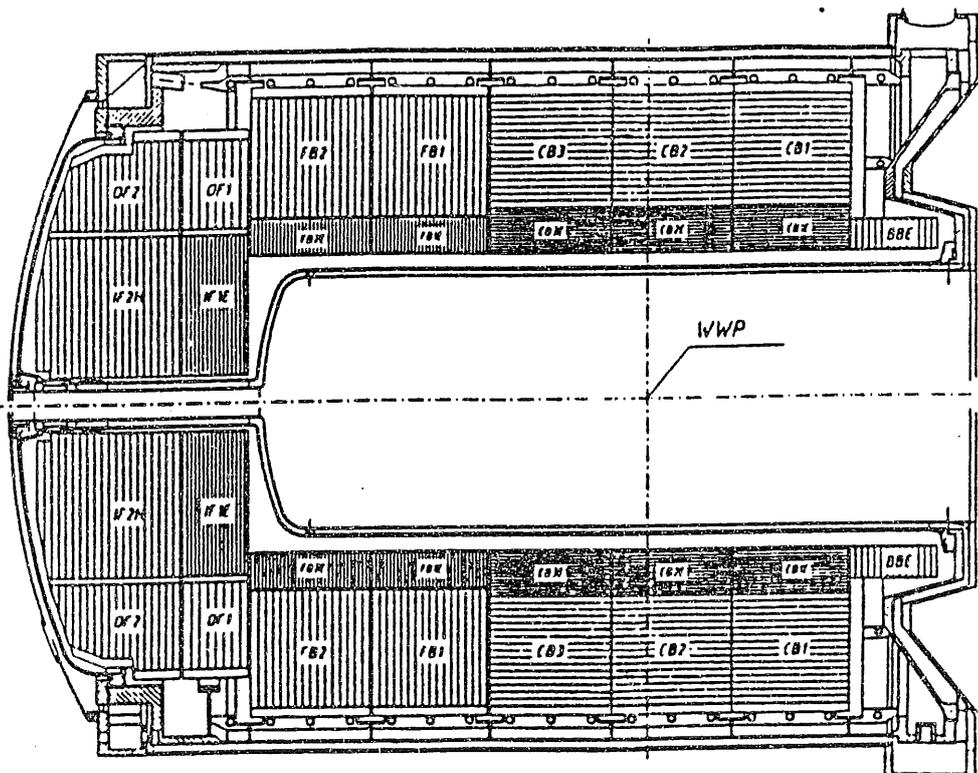


Abbildung 3.3: Das LAr-Kalorimeter von H1

derum zweigeteilt: Der innere Teil [4] dient zur Messung des elektromagnetischen Energieanteils und ist im Abstand von 2.35 mm mit 2.4 mm dicken Bleiabsorberplatten bestückt. Im äußeren Teil [5], der zur Messung der hadronischen Energiekomponente dient, sind die Absorber 19 mm dicke Edelstahlplatten in einem Abstand von 4.6 mm.

Im Rückwärtsbereich ($150^\circ < \vartheta < 178^\circ$) außerhalb des LAr befindet sich ein weiteres (warmes) Sampling-Kalorimeter (BEMC) [12] zur Messung elektromagnetischer Energie mit einem Sampling von 2.5 mm Blei und 4 mm Szintillatormaterial.

Im Vorwärtsbereich schließlich wurde das sog. Plug-Kalorimeter [13] installiert, dessen Aufgabe es ist, in der Region, in der hauptsächlich Protonfragmente erwartet werden ($0.72^\circ < \vartheta < 3.44^\circ$), die Transversalenergie zu bestimmen. Diese Komponente ist bislang erst zu ca. einem Viertel installiert.

Die hadronische Energie die aus dem LAr-Kalorimeter bzw. dem BEMC herausleckt, soll im sog. *Tailcatcher* gemessen werden. Dieser besteht praktisch aus dem gesamten instrumentierte Eisenjoch (s.u.) und ist ein Eisen/Streamerrohr-Sampling-Kalorimeter dessen Aufbau im Zusammenhang mit dem gesamten Myonsystem in Kapitel 4 erklärt wird. Die energieabhängige Auflösung der Kalorimeter kann wie folgt parametrisiert werden [9]

$$\frac{\sigma}{E} = \sqrt{\frac{A^2}{E} + \frac{B^2}{E^2}} + C .$$

Tabelle 3.1 zeigt die wichtigsten Parameter der der H1-Kalorimeter[10].

Tabelle 3.1: Charakteristische Parameter der H1-Kalorimeter

	Strahlentiefe in $X_0 \lambda$	Granularität in cm^2	Zahl der Kanäle	Parameter der Energieauflösung		
				$A[\% \cdot GeV^{1/2}]$	$B[\% \cdot GeV]$	$C[\%]$
LAr e^-	30 – 20 1	10 – 100	30784	11.20 ± 0.05	15.2 ± 0.4	0.64 ± 0.07
LAr π	6 – 4	50 – 2000	13568	46.1 ± 0.7	73 ± 3	2.6 ± 0.2
BEMC	22 1	250	88	10.5	-	-
Tailcatcher	4.5	2500	4000	100	-	-

3.3 Die supraleitende Spule

Mit einem Durchmesser von 6 m umschließt die supraleitende Spule den Kryostaten mit den LAr-Kalorimetern [6]. Dies hat den Vorteil, daß die kalorimetrischen Messungen stattfinden können, ohne daß vorher in dieser Hinsicht inaktives Material nicht vernachlässigbarer Dicke passiert werden muß. Das erzeugte Magnetfeld erreicht eine magnetische Flußdichte von $B = 1.14 T$ und verläuft im Zentralbereich parallel zum Strahlrohr. Aus der in den Spurkammern gemessenen Spurkrümmung geladener Teilchen im Magnetfeld läßt sich deren Impuls messen.

3.4 Das Myonspektrometer in Vorwärtsrichtung

Das Vorwärts-Myon-Spektrometer deckt den Winkelbereich $5^\circ < \vartheta < 20^\circ$ ab und hat die Aufgabe, die Impulse hochenergetischer Myonen zu messen [11]. Dies geschieht mit je zwei Driftkammern (radial und azimuthal) vor und hinter einem Toroidmagneten, der ein Feld senkrecht zum Strahlrohr erzeugt. Aus der Spurkrümmung wird auf die Myonenergie zurückgeschlossen. Dabei erreicht man Impulsaufösungen

$$\frac{\sigma_{p\mu}}{p\mu} = 0.23 \text{ für } p\mu = 25 \text{ GeV} \quad \text{und} \quad \frac{\sigma_{p\mu}}{p\mu} = 0.32 \text{ für } p\mu = 150 \text{ GeV}$$

3.5 Das Instrumentierte Eisen und die Myonlagen

Die äußerste Schale des H1-Detektors stellen das instrumentierte Eisenjoch und die Myonlagen dar [9] [10]. Die zehn 7.5 cm dicken Eisenplatten dienen natürlich primär der Rückführung des magnetischen Flusses der Spule. In den sie trennenden Schlitzen, sowie außen und innen sind Lagen aus Streamerrohrkammern und Streifenelektroden untergebracht, die zur Spur- und Impulsbestimmung der durchgehenden geladenen Teilchen (vor allem Myonen) dienen. Flächenhafte sog. *Pad*-Elektroden sammeln die Influenzladung und liefern so kalorimetrische Information des Tailcatchers.

Da das Instrumentierte Eisen, resp. das Streamerrohrkammer-System, als Objekt der Untersuchungen dieser Arbeit einer detaillierteren Beschreibung bedarf, ist dieser das gesamte nächste Kapitel gewidmet.

3.6 Trigger und Datenfluß bei H1

Die hohe Strahlkreuzungsfrequenz von ca. 10 MHz sowie die großen zu verarbeitenden Datenmengen (siehe Tabelle 3.6) oben beschriebener Komponenten von H1 stellen hohe Anforderungen an die Selektion der Ereignisse, da die von der Ausleseelektronik maximal bewältigte Ereignisrate ca. 100 Hz, die maximale Abspeicherungsfrequenz der Ereignisse durch den IBM 3390/2-Großrechner am DESY [13] sogar nur ca. 5 Hz beträgt. Die Entscheidung, ob alle Detektorkomponenten bei einem Ereignis vollständig ausgelesen und die Daten abgespeichert werden, fällt der H1-Trigger in vier Stufen, aufgrund zunehmend detaillierten Informationen über das Ereignis. Dies sind sowohl reine Detektorinformationen (Stufe 1-3) als auch erste Ergebnisse der Rekonstruktion durch eine speziell hierfür eingesetzte Mikroprozessorenfarm (Stufe 4) [14]. Nach jeder Stufe wird neu entschieden, ob das Ereignis für die Analyse verworfen oder die Auslese fortgesetzt wird [15].

Entscheidet die letzte Stufe des Triggers für eine Speicherung des Ereignisses, werden die Rohdaten aller getroffenen Kanäle aller Detektorkomponenten, also im wesentlichen die Kanalnummern im Format des beim DESY entwickelten Datenverwaltungssystem *BOS* [16] weggeschrieben. Die Rohdaten aller H1-Subkomponenten finden sich in sog. *Bänken* wieder, deren Namen Auskunft über ihre Herkunft geben.

Die ersten 32 der aktuell 96 Stufe 1-Triggerbedingungen, inklusive all jener, die auch den Myontrigger [6] ¹ berücksichtigen (Triggerbits 14-28) zeigt Abbildung 3.4, eine Kopie des Kontrollrechnerbildschirms der Zentralen H1-Datennahme. In der Spalte

¹siehe auch Kapitel 4

	Zahl der Kanäle	Rohdaten/MB
Driftkammern	9648	~ 2470
Proportionalkammern	3936	~ 2
LAr-Kalorimeter	45000	~ 262
Kalorimeter-Trigger	50000	~ 50
Rückwärts-Kalorimeter	1500	~ 7.5
Plug-Kalorimeter	800	~ 4
Streamerammern	130000	~ 20
Luminositätsdetektor	256	~ 66

Tabelle 3.2: Erwartete Datenmengen der H1-Hauptkomponenten

Trigger Level	Trigger Mask 1	Hz	#	Counts since Run Start	Prescale Factor
0	lvl BSET-CL2 X	2.10	0.	5271	0
1	lvl lvl BSET-Elot * BSET-LTO X	1.13	1.	2108	0
2	lvl BSET-Elot * BSET-LTO * TOF-IA X	0.95	2.	2411	0
3	lvl BSET-Elot * BSET-LTO * ZVTX-sia1 X	0.39	3.	733	0
4	lvl BSET-CL1 X	0.37	4.	711	0
5	BSET-CL2 X	0.05	5.	97	0
6	BSET-CL3 X	0.11	6.	211	0
7	BSET-EO1 X	0.11	7.	197	0
8	lvl BSET-GE1 X	0.04	8.	48	0
9	lvl BSET-Elot X	0.08	9.	153	0
10	lvl BSET-Elot * BSET-LTO X	0.15	10.	262	0
11	lvl lvl BSET-CL1 X	0.30	11.	607	0
12	lvl BSET-CL1 * TOF-IA X	0.69	12.	1841	0
13	undefined	0.00	13.	0	0
14	lvl Mu-GE1-FEC * zVTX-sia1	0.00	14.	0	0
15	lvl lvl Mu-GE1-FEC * not(BSET-Elot)	0.00	15.	0	0
16	lvl Mu-Mult * ZVTX-small X	0.11	16.	85	0
17	lvl Mu-GE1-FEC * ZVTX-small X	0.53	17.	775	0
18	lvl Mu-GE1-barrel * ZVTX-small X	0.26	18.	453	0
19	lvl Mu-GE1-BEC * ZVTX-small X	0.00	19.	108	0
20	lvl Mu-GE1-FEC * Mu-GE1-BEC * VETO-invGL X	0.09	20.	207	0
21	lvl Mu-GE1-FEC * Mu-GE1-BEC * VETO-outGL X	0.04	21.	36	123
22	lvl Mu-GE1-FEC * ScBoOr	0.00	22.	0	0
23	lvl Mu-GE1-FEC * Mu-GE1-BEC	0.00	23.	0	0
24	lvl lvl Mu-GE1-FEC * not(zVtx-max)	0.83	24.	1232	0
25	lvl lvl Mu-GE1-BEC X	0.04	25.	217	0
26	lvl lvl Mu-GE1-barrel X	0.26	26.	506	0
27	lvl lvl Mu-Mult X	0.15	27.	152	0
28	lvl lvl Mu-GE1-barrel /Gavler! X	1.77	28.	2785	0
29	undefined	0.00	29.	0	0
30	undefined	0.00	30.	0	0
31	undefined	0.00	31.	0	0

Abbildung 3.4: Die ersten 32 Stufe 1 Triggerbits der zentralen H1-Datennahme.

„Triggermask I“ befinden sich die jeweils zu den Triggerbits gehörenden Bedingungen, die logarithmische Anzeige in der Mitte zeigt die aktuelle Rate, mit der diese Bedingung erfüllt wird. Ist diese Rate z.B. durch Untergrundereignisse zu groß, wird sie mit dem sog. „Prescale Factor“ P skaliert, der dafür sorgt, daß nur jedes P -te dieser Ereignisse an die Triggerstufe 2 weitergegeben wird. Dieser steht jeweils in der Spalte rechts außen. Die einzelnen Triggerbedingungen sind nun an verschiedene physikalische Erwartungen angepaßte Forderungen (von Kombinationen) von Triggersignalen verschiedener Subtriggererelemente/Detektorkomponenten. So ist z.B. die Bedingung BSET-... ein Energietrigger aus dem BEMC, ZVTX-... ein Trigger bei Koinzidenzen zwischen CIP und COP (s.o.). Die Myon-Triggerbedingungen erklären sich zusammen mit der Nomenklatur aus dem folgenden Kapitel selbst.

Kapitel 4

Das H1-Myonnachweissystem

4.1 Die Streamerrohr-Kammern

Zum Nachweis von Myonen entschied man sich beim H1-Detektor für die schon in früheren Experimenten bewährten Iarocci-Streamerrohr-Kammern [17]. Diese wurden allerdings in zwei Punkten modifiziert :

- zum Bau wurde anstelle von PVC *Luranyl* (©BASF), ein neu entwickelter halogenfreier Kunststoff verwendet.
- statt des zweikomponentigen Standardgases aus 25% Argon und 75% Isobutan verwendet man eine wiederum nichtbrennbare Mischung aus 2.5% Argon, 9.5% Isobutan und 88% Kohlendioxid.

Die Produktion dieser H1-Streamerrohr-Kammern wurde in industriellem Maßstab realisiert: die Extrusion des von den BASF gelieferten Granulats wurde von der Firma TKG Ensinger (Nufringen) ausgeführt, die Beschichtung der Kunststoffplatten durch die Firma Krieg (Stuttgart). Zusammengebaut wurden die Kammern in den Mechanischen und Elektrotechnischen Werkstätten der Physikalischen Institute der RWTH Aachen und der Universität Hamburg.

4.1.1 Aufbau

Die kleinste Einheit des H1-Streamertube-Systems, im weiteren der Einfachheit halber *STS* genannt, ist ein 1-6m langes Streamerrohr mit einem quadratischen Innenquerschnitt von $9 \times 9 \text{ mm}^2$ [11], in dessen Mitte ein geerdeter $100 \mu\text{m}$ dicker versilberter Kupfer-Beryllium-Draht gespannt ist. Diese kleinste Einheit wird des weiteren als *Zelle* bezeichnet. Acht dieser Rohre nebeneinander, jeweils getrennt durch einen 1 mm dicken Steg, bilden ein sog. *Profil*. Dessen Innenseite, die bei Normaldruck auf einem Potential von -4500V gehalten wird (siehe 4.3), besitzt durch eine Graphitschicht einen Oberflächenwiderstand von ca. $10 \text{ k}\Omega/\square$. Die Profilabdeckung aus *Luranyl* ist ebenfalls graphitbeschichtet und hat einen Oberflächenwiderstand von ca. $10 \text{ M}\Omega/\square$. Zwei solcher Profile werden zu einem sog. *Element* in einer gasdichten *Luranyl*-Box zusammenfaßt. Mehrere o.g. Elemente, nebeneinander zu Ebenen zusammengebaut, füllen nun die Schlitze

des Eisenjochs und werden des weiteren als *Drahtlage* bezeichnet. Auf diese Lagen sind zusätzlich Influenzelektroden aufgeklebt:

- senkrecht zur Drahtrichtung 17 mm breite Kupferstreifen (*Strips*) zur Myonspur-Rekonstruktion
- und $30 \times 30 \text{ cm}^2$ bzw. $40 \times 50 \text{ cm}^2$ große sog. *Pads*, über deren gesammelte Ladung auf die im Eisen deponierte hadronische Energie geschlossen wird.

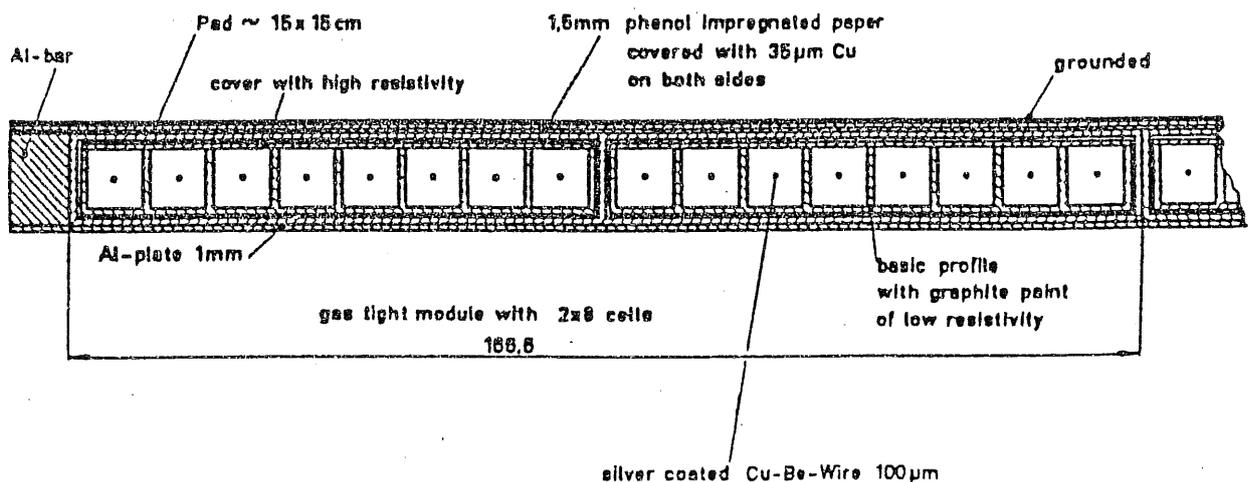


Abbildung 4.1: Querschnitt durch ein H1-Streamerrohr-Element

4.1.2 Funktionsweise

Passiert ein geladenes Teilchen das aktive Gasvolumen eines Streamerrohrs, so ionisiert es auf seinem Weg die Gasmoleküle in der Kammer. Im inhomogenen, durch die zwischen Draht und Rohrmantel anliegende Hochspannung erzeugten elektrischen Feld werden die Elektronen der Ionisation zum Draht hin so stark beschleunigt, daß es zu Stoßionisation weiterer Gasmoleküle kommt. Die dabei entstehende Elektronenlawine bewegt sich sehr rasch in Richtung Anodendraht. Im Proportionalmodus ist die erzeugte Ladungsmenge proportional zur Primärionisation mit Gasverstärkungen von bis zu 10^7 .

Bei Erhöhung der Spannung zwischen Draht und Rohrmantel (und damit der elektrischen Feldstärke) steigt sowohl die in der Lawine erzeugte Ladung als auch die Produktion von Photonen durch Stöße und Rekombination. Der hochgradig ionisierte Bereich zwischen Kammerwand und Draht wird als *Streamer* bezeichnet. Um zu verhindern, daß Photonen innerhalb kurzer Zeit durch Photoionisationen und -effekt außerhalb des Streamers das gesamte Gasvolumen im Rohr ionisieren, ist dem Zählgas ein sog. *Löschgas* beigemischt. Dieses hat die Aufgabe, die UV-Photonen zu absorbieren, ohne dabei selbst ionisiert zu werden, und ist meist ein mehratomiges organisches Gas, in diesem Fall Isobutan $i-C_4H_{10}$. Erreicht nun der Streamer den Draht, wird die erzeugte Ladung über den Spannungsabfall an einem Widerstand meßbar und gibt bei bekannten Drahtkoordinaten eine zweidimensionale Ortsinformation, da dann zwar bekannt ist *welche* Zelle getroffen wurde, aber nicht

wo entlang des Drahtes.

Durch die hochresistive Graphitbeschichtung der Kammerwände wird auf den aufgeklebten Strips und Pads ein Signal influenziert, das im Falle der Strips ebenfalls eine zweidimensionale Ortsinformation in der Ebene senkrecht zur Lage parallel zum Draht liefert. Die Pads ermöglichen über die mittlere Ladungsmenge pro gesetztem Streamer eine Aussage über die Energiedeposition des Teilchens im Eisen. [19][20][12].

4.2 Einteilung und Instrumentierung

Die Aufteilung des STS in Untereinheiten folgt aus der unterschiedlichen Orientierung und Länge der Lagen und Drähte in verschiedenen Detektorbereichen, der Position ihrer Ausleseseinheiten und natürlich der Systematisierung der Auslese selbst.

4.2.1 Subdetektoren

Im Zentralbereich des Detektors umschließt das Eisenjoch die z -Achse in Form einer "Tonne" oktogonalen Querschnitts (siehe Abbildung 3.2, die im weiteren *Barrel* genannt werden wird. Hier sind die Drähte parallel zur z -Achse gespannt. Der Barrel-Bereich ist nicht durchgehend instrumentiert, er teilt sich in Vorwärts- (FBA) und Rückwärts-Barrel (BBA) nach der Position der Ausleseseinheiten. Das Eisenjoch wird vorne und hinten von den zur xy -Ebene parallelen sog. *Endkappen* (FEC und BEC) geschlossen, in denen die Drähte parallel zur x -Achse gespannt sind.

Diese vier Myon-Subdetektoren werden zur systematischen Verarbeitung der von ihnen gelieferten Daten von hinten nach vorne mit $N_{Subdet.} = 0$ bis 3 bezeichnet (Abbildung 4.2).

4.2.2 Module

Jeder Subdetektor ist in 16 sog. *Module* unterteilt, deren Numerierung von 0 bis 15 sich zwanglos aus der Eiseninstrumentierung ergibt:

Im Vorwärts- und Rückwärts-Barrel ist jedes Modul gleich einem Halboktanten, in den Endkappen liegen beiderseits der yz -Ebene je acht Module übereinander (Abbildung 4.3). Zur Identifikation jedes Moduls mit einer *einzigsten* Nummer ($N_{Modul,global}$), sind die Modulnummern ($N_{Modul,Subdet.}$) in den drei Subdetektoren ($N_{Subdet.}$) folgendermaßen auf die Zahlen 0 bis 63 abgebildet:

$$N_{Modul,global} = 16 \cdot N_{Subdet.} + N_{Modul,Subdet.} \quad (4.1)$$

Im Weiteren werden stets die globalen Modulnummern benutzt und mit N_{Modul} bezeichnet.

4.2.3 Instrumentierung der Module

Ein Modul besteht i.a. aus 16 Drahtlagen, die den Raum direkt innerhalb und außerhalb des Eisenjochs sowie die Schlitze zwischen den Eisenplatten füllen. Die Drähte sind wie

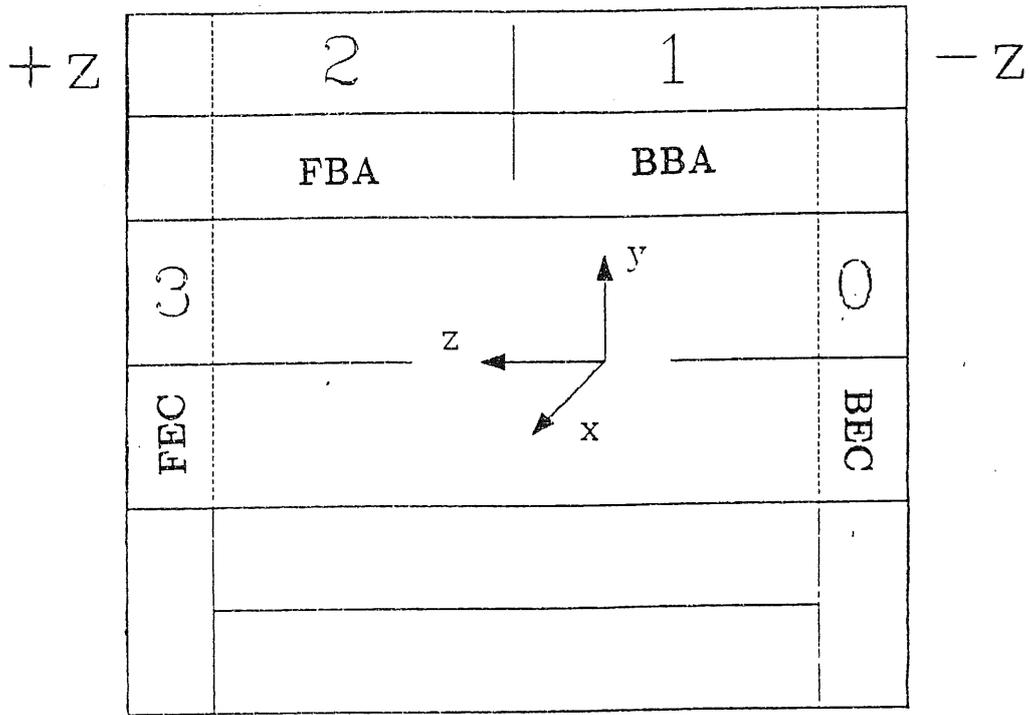


Abbildung 4.2: Unterteilung des H1-Streamerrohrsystems in Subdetektoren

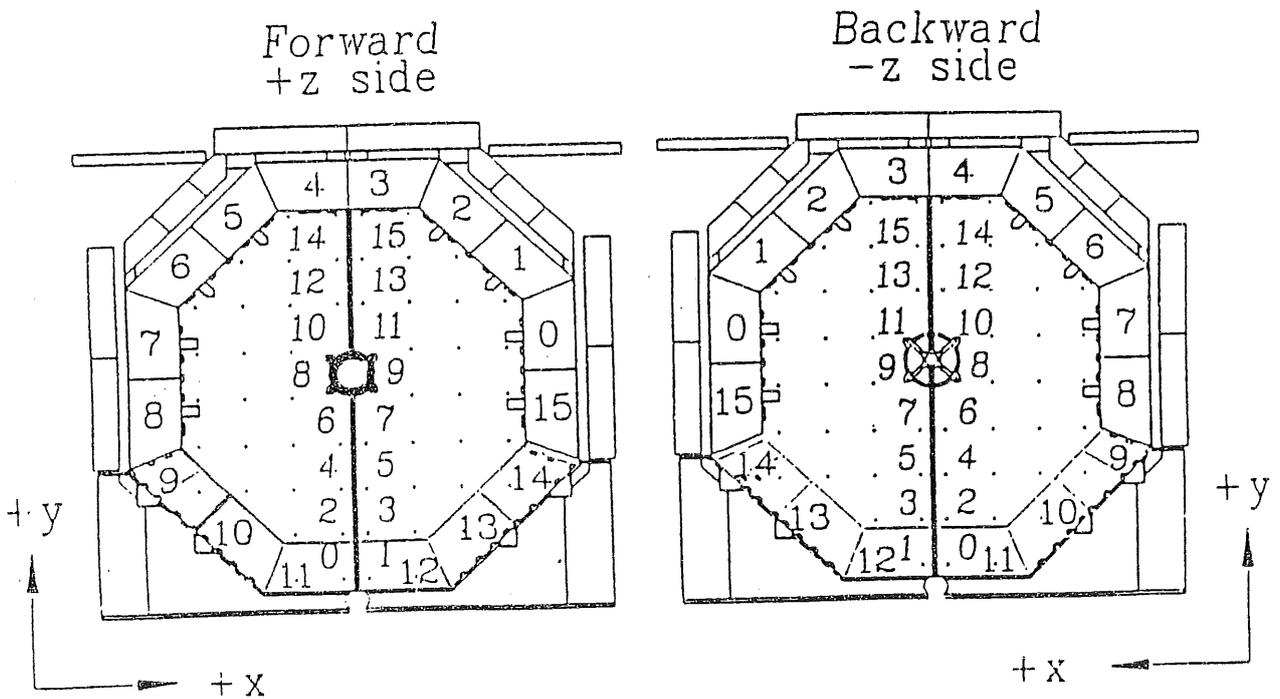


Abbildung 4.3: Unterteilung der Subdetektoren in Module

bereits erwähnt im Barrel parallel zur Strahlachse, in der Endkappe parallel zur x -Achse gespannt. Die Lagen sind in jedem Modul von innen nach außen von 0 bis 15 nummeriert und folgendermaßen instrumentiert:

Die Lagen 0–2 bestehen aus drei direkt aufeinander liegenden, in einer Aluminiumbox zusammengefaßten Drahtlagen aus 6 (Endkappe) bzw. 9–14 (Barrel) Elementen. Die Lagen 0 und 1 sind mit Streifen versehen, Lage 2 flächendeckend mit Pads. Zur Maximierung der geometrischen Nachweiswahrscheinlichkeit (siehe Kapitel 5) in dieser sog. *Myonbox* sind die Lagen 1 und 2 eine halbe Rohrbreite senkrecht zur Drahtrichtung gegeneinander verschoben (Abbildung 4.4). Die nach außen folgenden mit Pads beklebten Lagen 3–5 be-

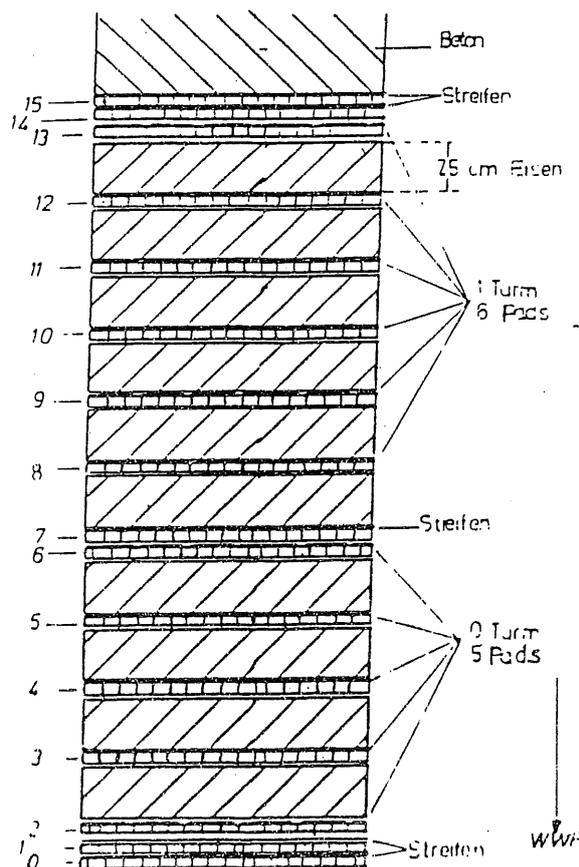


Abbildung 4.4: Schnitt durch ein Modul des H1-Streamerrohrsystems

stehen aus 5 (Endkappe) bzw. 7–10 (Barrel) Elementen und liegen jeweils in den 2,5 cm breiten Schlitzen zwischen den Eisenplatten. Die Lagen 6 und 7 liegen in demselben Schlitz direkt übereinander wiederum um eine halbe Rohrbreite gegeneinander verschoben, wobei Lage 6 mit Pads, Lage 7 mit Streifen bestückt ist. Die Lagen 8–12 sind analog zu den Lagen 3–5 aufgebaut und lokalisiert. Außerhalb des Eisenjochs komplettieren die Lagen 13–15 in Form einer Myonbox analog zu den Lagen 0–2 die Instrumentierung eines Moduls.

Da im Barrel die Lagenbreite nach außen hin zunimmt und die Lagen jeweils nur mit ganzen Elementen instrumentiert werden, ergeben sich nichtinstrumentierte Bereiche in-

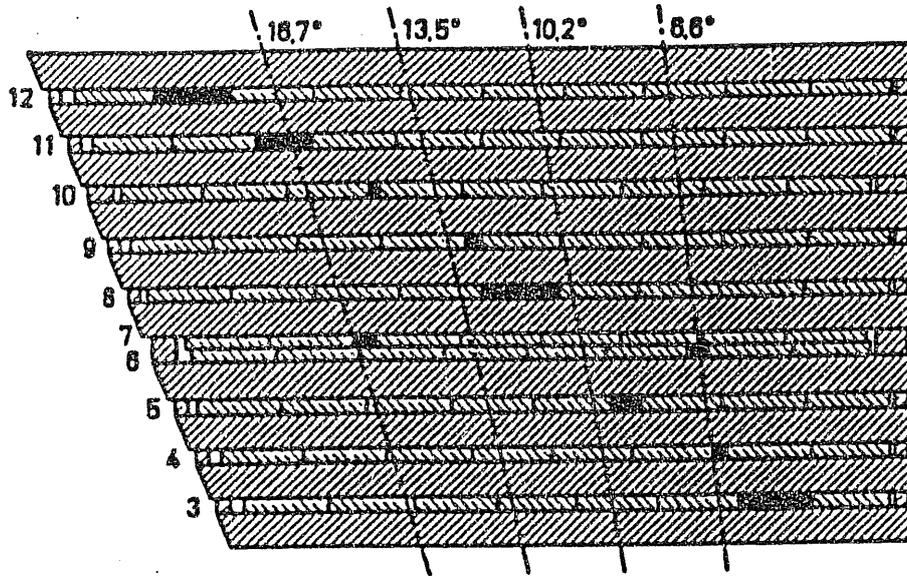


Abbildung 4.5: Verteilung der Dummies in den Barrelmodulen

nerhalb der Lage, die aber im Modul so verteilt sind, daß bei senkrechtem Teilchendurchgang höchstens einer dieser sog. *Dummies* passiert wird (Abbildung 4.5).

Zu den Myonboxen ist anzumerken, daß sie sich im Barrel sowohl in z -Richtung aufgrund ihrer größeren Drahtlänge über Subdetektorgrenzen als auch aufgrund ihrer größeren Breite über Modulgrenzen hinweg erstrecken. In den Endkappen bestehen sie aus einem Element mehr als die Eisenlagen und übertreten dadurch Modulgrenzen.

Dies hat zur Folge, daß zwar jeder Myonbox eine Modulnummer zugeordnet ist, umgekehrt aber nicht zwangsläufig zu jeder Modulnummer eine innere und/oder äußere Myonbox existiert. Die Anordnung der Myonboxen zeigen die Abbildungen 4.6 und 4.7.

Abbildung 4.8 zeigt den Status der Instrumentierung während der ersten Runperiode 1992, wobei die unterstrichenen Lagennummern für Striplagen stehen, die durchkreuzten Felder für nicht vorgesehene Lagen und die mit „[]“ gekennzeichneten Felder für noch nicht installierte Lagen.

4.3 Gas- und Hochspannungsversorgung

Die H1-Streamerrohrkammern werden von fünf Hochspannungsgeräten mit jeweils 40 Kanälen versorgt. In der ersten Runperiode versorgten 138 dieser Kanäle jeweils zwei bis zehn Drahtlagen. Die Kanäle können zu geeigneten Gruppen zusammengefaßt und vom H1-Kontrollraum aus simultan geregelt und überwacht werden. Übersteigt der Strom eines Kanals für eine bestimmte Zeit die Grenze von $5\mu A$, wird die Hochspannung für diesen Kanal automatisch reduziert, bis die Stromgrenze erreicht ist. Daraufhin wird die Hochspannung wieder dem nominellen Wert angeglichen, es sei denn die Stromgrenze wird wiederum überschritten. Gelingt es innerhalb einer wählbaren sog. *Tripzeit* nicht, die Hochspannung dieses Kanals auf den nominellen Wert einzustellen, wird er abgeschal-

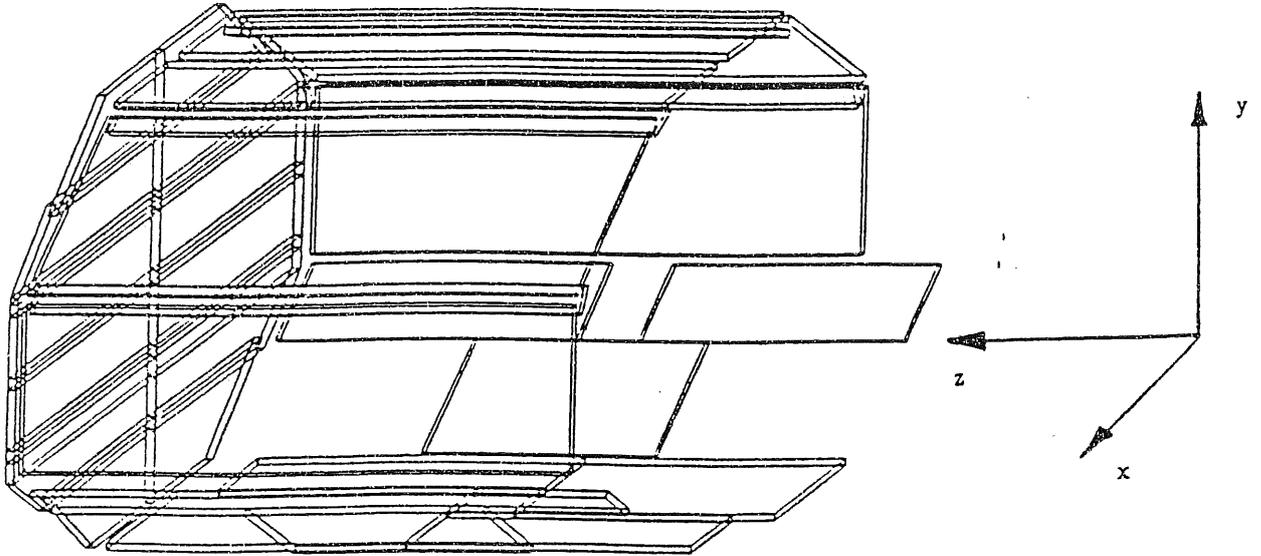


Abbildung 4.6: Die inneren Myonlagen des H1-Detektors

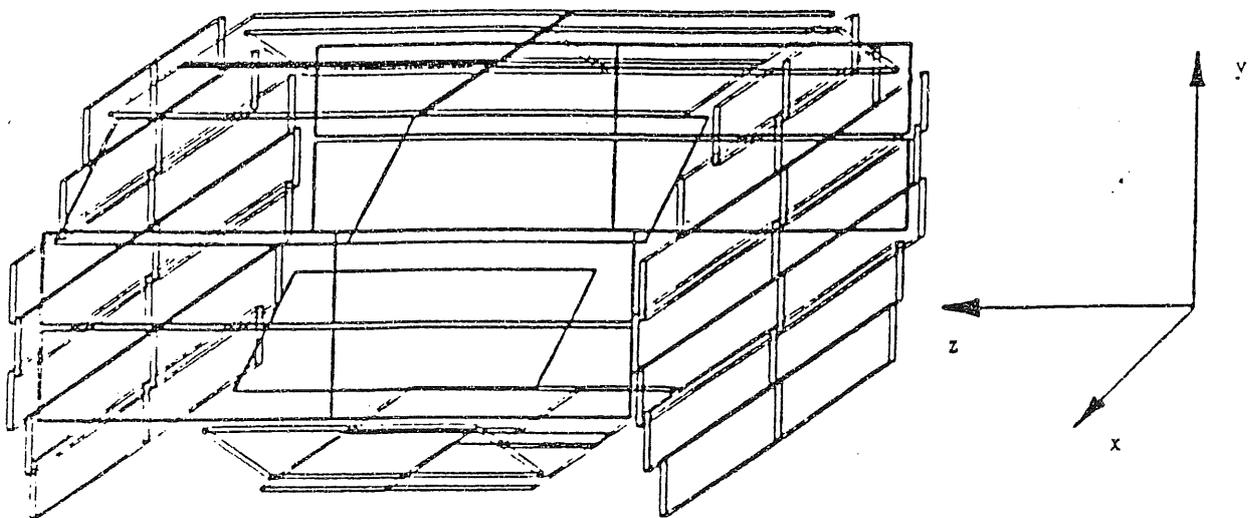


Abbildung 4.7: Die äußeren Myonlagen des H1-Detektors

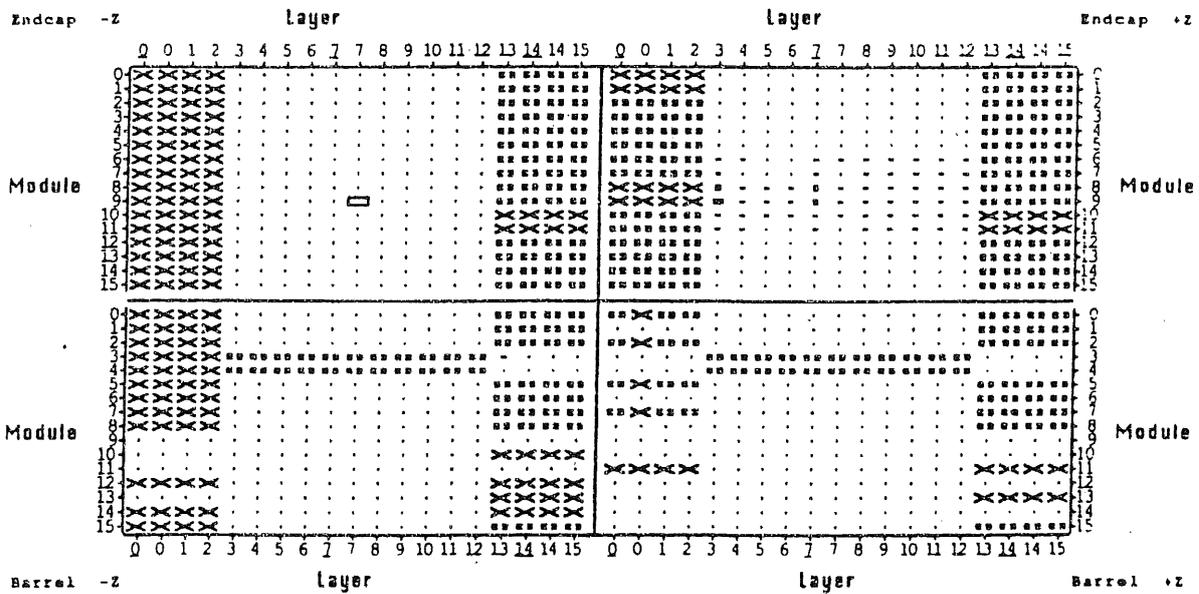


Abbildung 4.8: Status der Instrumentierung des Myonsystems des H1-Detektors 1992

tet. Bei einem Außendruck von 1013 hPa beträgt die Betriebsspannung 4500 V . Sie wird nach Untersuchungen der Abhängigkeit der in den Kammern gemessenen Ladungsspektren von Druck und Temperatur [18] um diesen Wert reguliert. Der Luftdruck p wird permanent gemessen und die Hochspannung um die vorzeichenbehaftete, druckabhängige Größe ΔHV korrigiert, wobei

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

Die Kammern werden von einer Gasmischanlage über ca. 220 Passagen mit Frischgas versorgt, dessen Zusammensetzung durch Flußmesser kontrolliert wird. Es wurde zwar ein System entwickelt in dem das Gas wiederverwendet wird, dieses wurde aber bis dato nicht installiert, so daß auch über die Testphase hinaus in der ersten Runperiode immer noch ein offenes System vorliegt, in dem der Gasdruck in den Kammern durch die Klappe des Auslaßschornsteines reguliert wird.

4.4 Auslese

4.4.1 Das STS als Triggerelement

Wie schon bei der Beschreibung des H1-Detektors erwähnt (Abschnitt 3.6), fungiert auch das Myonsystem im Eisen als Triggerelement. Wird jeweils mindestens ein Draht der Layer 3, 4, 5, 8 und 12 eines Moduls getroffen, wird in den Ausleseeinheiten dieser Layer ein Bit für "getroffen" gesetzt. Die Informationen der fünf Triggerlagen werden in ein RAM, das *Layer-Board*, gefüllt, das praktisch alle logischen Verknüpfungen ihrer Kombination

auszuführen in der Lage ist. Bei Erfüllung der vorher in das Layer Board programmierten Triggerbedingung, wird hierfür ein Bit gesetzt, das zusammen mit den Informationen aller anderen 63 Layer-Boards in einer weiteren Verarbeitungseinheit, dem sog. *Sector-Board* in mehreren RAMs auf zusätzliche Bedingungen überprüft wird, wie z.B. Modultrigger aus bestimmten Modulen und/oder Subdetektoren. Werden diese ebenfalls erfüllt, liefert das acht Beiträge zur Triggerstufe 1 : für jeden Subdetektor die Informationen „ein Myon“ und „mehr als ein Myon“ (in Abbildung 3.4 „Mu-GE1“). Die Standardbedingung der ersten Runperiode 1992 für einen Layer-Board-Trigger sind drei getroffene von fünf Triggerlagen eines Moduls, deswegen im weiteren auch als Modultrigger-Bedingung bezeichnet.

4.4.2 Das STS in der Spurrekonstruktion

Die Auslese der Drähte und Strips erfolgt digital, d.h. deren Signale werden mit einem Schwellenwert verglichen, bei dessen Übersteigen eine Flagge für „getroffen“ gesetzt wird, die ansonsten auf „nicht getroffen“ verbleibt. Für jeden getroffenen Draht und Strip wird diese Information folgendermaßen festgehalten: jedem Draht ist eineindeutig eine Nummer ($N_{\text{Draht,global}}$) zugeordnet, die sich aus Modul- (N_{Modul}) und Lagenummer (N_{Lage}), sowie der Elementnummer in der Lage (N_{Element}) und der Drahtnummer im Element ($N_{\text{Draht,Element}}$) zusammensetzt:

$$N_{\text{Draht,global}} = N_{\text{Modul}} \cdot 2^{13} + N_{\text{Lage}} \cdot 2^9 + N_{\text{Element}} \cdot 2^4 + N_{\text{Draht,Element}} \quad (4.2)$$

analog für die Strips

$$N_{\text{Strip,global}} = N_{\text{Modul}} \cdot 2^{13} + N_{\text{Lage}} \cdot 2^9 + N_{\text{Strip,Lage}} \quad (4.3)$$

Diese Nummern werden für getroffene Drähte und Strips in sequentieller Form in den BOS-Bänken IRWE und IRSE (Iron Response Wire/Strip Event) pro Ereignis weggeschrieben. Die Sollpositionen der Drähte und Strips sind in der H1-Datenbasis enthalten, so daß man jeweils zu jeder Nummer eine zweidimensionale Rauminformation erhält. Bei den Drahtlagen, die mit Strips beklebt sind, erreicht man so im Idealfall, daß in der getroffenen Lage nur ein Draht und ein Strip ein Signal geben eine dreidimensionale Ortsauflösung der Größenordnung 1 cm^3 .

4.4.3 Das STS als Kalorimeter-Tailcatcher

Die Pads übereinanderliegender Lagen sind zu sog. *Türmen* zusammengefaßt (siehe Abbildungen 4.4 und 4.9). Sie werden analog ausgelesen, d.h. es wird die auf ihnen gesammelte Ladung gemessen. Diese Analoginformation wird ebenfalls in einer BOS-Bank IRTE (Iron Response Tower Event) dokumentiert. Von ihr wird über die im Mittel zur Erzeugung eines Streamers notwendige Energie auf die hadronische Energiedeposition der Teilchen in diesem Eisen-Streamerrohr-Kalorimeter (siehe Kapitel 3) rückgeschlossen.

Die letzten drei Abschnitte machen deutlich, daß das Myonsystem für das gesamte H1-Experiment eine gewichtige Rolle spielt. Diese Tatsache macht das Wissen um seine Leistungsfähigkeit so interessant.

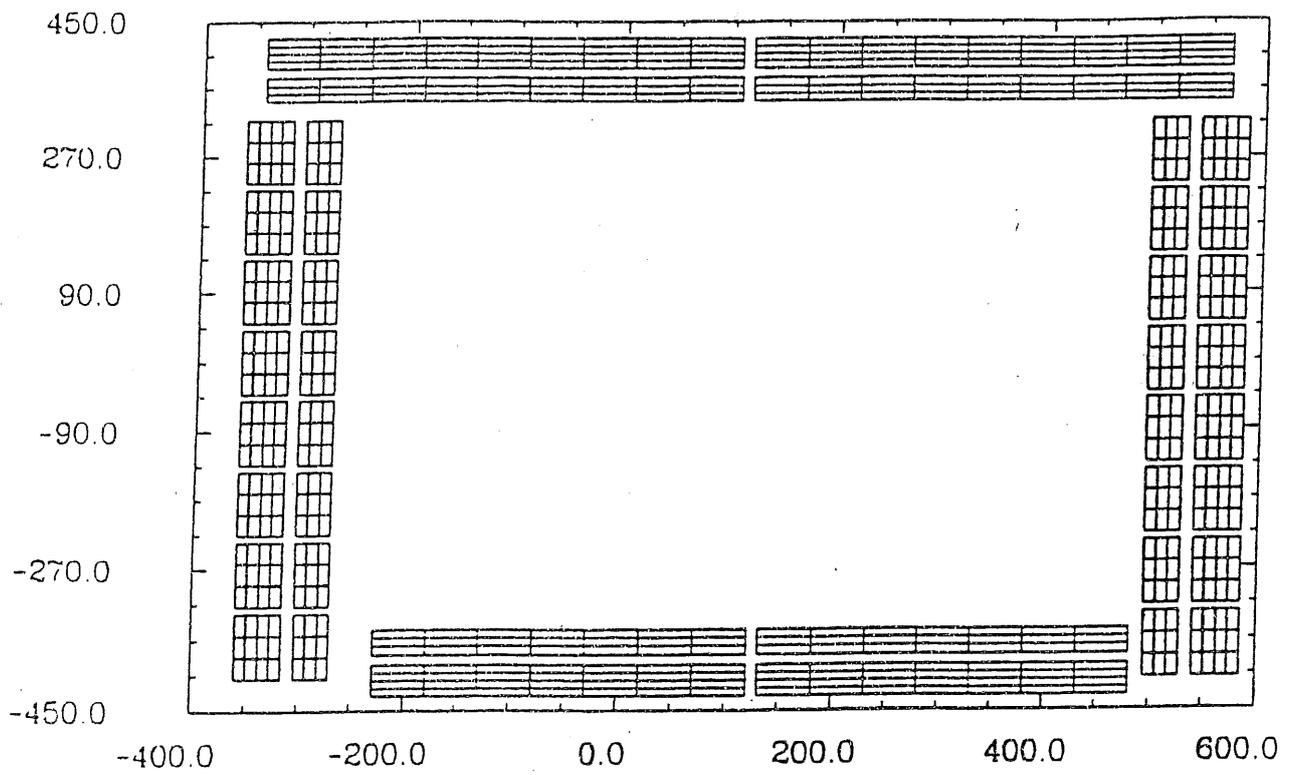


Abbildung 4.9: Die Turmverteilung im H1-Detektor (Längsschnitt)

Kapitel 5

Vorüberlegungen

5.1 Motivation

Die Leistungsfähigkeit des H1-Myonsystems läßt sich an drei charakteristischen Größen seiner verschiedenen Aufgabenbereiche messen:

- der Energieauflösung des Tailcatcher-Kalorimeters,
- der Güte der rekonstruierten Spur im Eisen und
- der Triggerwahrscheinlichkeit für Myonen.

Diese drei Größen hängen letztlich alle von der Nachweiswahrscheinlichkeit für Myonen ab, die ihrerseits maßgeblich bedingt ist durch das den jeweiligen äußeren Bedingungen (Druck, Temperatur) anpaßte Zusammenspiel des Gases und der Hochspannung. Die Genauigkeit der Spurrekonstruktion im Eisen hängt zusätzlich ab vom Grad der Übereinstimmung der tatsächlichen Geometrie des Systems mit der in der H1-Datenbasis festgehaltenen.

Daraus folgt, daß man mit Wissen um die Nachweiswahrscheinlichkeit nicht nur die oben genannten Größen genauer bestimmen, sondern auch Aussagen über die Nachweiswahrscheinlichkeit von Prozessen mit Myonen sowie Gasqualität, Hochspannungsstabilität und Deplazierung der Kammern bzgl. der dokumentierten Geometrie treffen kann. Dies wird nach Definition und ggf. Herleitung der wesentlichen Größen in diesem und Entwicklung des Bestimmungsalgorithmus im nächsten Kapitel dann auch mit Hilfe des kompletten Programms realisiert.

5.2 Problematik

Das Eisen-Streamerrohr-System ist vom Wechselwirkungspunkt aus die äußerste Komponente des H1-Detektors. Aus diesem Grund existiert zum einen für Myonen, die das STS passieren, abgesehen vom Vorwärts-Myonspektrometer keine von diesem unabhängige Triggermöglichkeit, wie z.B. Szintillationszähler inner- und außerhalb des Eisens. Zum anderen existieren nichtinstrumentierte Bereiche (Dummies), auf die bei der Bestimmung

der Nachweiswahrscheinlichkeit des STS korrigiert werden soll. Dies bedeutet die Notwendigkeit einer Spurbestimmung der Myonen, für die ein zusätzlicher Detektor, unabhängig vom STS, fehlt.

Die sich daraus ergebende grundsätzliche Problematik ist also, daß sowohl die Triggierung der Ereignisse als auch die Bestimmung der Myonspuren von eben dem Detektor übernommen werden müssen, dessen Nachweiswahrscheinlichkeit man bestimmen will. Dadurch ergeben sich zum Teil zwangsläufig systematische Differenzen zwischen gemessener und wahrer Nachweiswahrscheinlichkeit, auf die im Anschluß an die Definition und Herleitung der wichtigsten Größen und Zusammenhänge eingegangen wird.

5.3 Definitionen

5.3.1 Lagennachweiswahrscheinlichkeit

Die in dieser Arbeit und auch im zugehörigen Programm als Maß für die Effektivität des Myonsystems bestimmte Größe ist die Nachweiswahrscheinlichkeit ϵ_{lay} ¹ für Myonen in einer Drahtlage. Diese Wahrscheinlichkeit ist gegeben durch die Gesamtzahl $N_{\mu,pass}$ der Myonen, die die Lage passiert haben und die Zahl $N_{\mu,det}$ der davon nachgewiesenen:

$$\epsilon_{lay} = \frac{N_{\mu,det}}{N_{\mu,pass}}$$

Da die Kammern digital ausgelesen werden, ist die Wahrscheinlichkeit ϵ_{lay} binomial verteilt und mit einem statistischen Fehler $\sigma(\epsilon_{lay})$ behaftet, für den gilt [21]:

$$\sigma(\epsilon_{lay}) = \sqrt{\frac{\epsilon_{lay}(1 - \epsilon_{lay})}{N_{\mu,pass}}} \quad (5.1)$$

Dieser Fehler wird im weiteren mit $\Delta\epsilon_{lay}$ bezeichnet. Hieraus folgt direkt, daß zur Unterschreitung einer Fehlergrenze $\Delta\epsilon_{lay} = 1\%$ mindestens

$$N_{\mu,pass} = 10^4 \cdot \epsilon_{lay}(1 - \epsilon_{lay}) \quad (5.2)$$

Ereignisse pro Lage benötigt werden. Die erste Anforderung an den zu entwickelnden Algorithmus zur Bestimmung von ϵ_{lay} ist also eine hohe Ausbeute der zur Analyse verfügbaren Daten.

5.3.2 Streamerwahrscheinlichkeit

Unter der Streamerwahrscheinlichkeit ϵ_{stream} , im Programm ESTR genannt, sei im folgenden die Wahrscheinlichkeit verstanden, daß durch ein das aktive Volumen eines Rohres passierendes Myon, auch mindestens ein Streamer gesetzt wird, dessen Ladung die Schwelle zum Setzen des Signals „getroffen“ überschreitet. Maßgeblich bestimmt wird ϵ_{stream} , durch die Qualität des Gases und die Hochspannung, die die Ionisationswahrscheinlichkeit bedingen. Letztere hängt zusätzlich ab vom durch das Myon im aktiven

¹engl.: layer = Lage

Volumen zurückgelegten Weg, also dem Eintrittswinkel und -ort des Myons in die Lage. Die Abhängigkeit der Ladungsausbeute der H1-Streamer-Kammern vom Eintrittswinkel wurde unter Laborbedingungen bereits untersucht [20], nicht jedoch die Wahrscheinlichkeit, daß überhaupt mindestens ein ausreichend großer Streamer gesetzt wird. Geht man daher davon aus, daß die zum Setzen eines Streamers erforderliche Mindestweglänge des Myons innerhalb des Rohrs sehr kurz ist, kann man ϵ_{stream} als konstant, also vom Eintrittswinkel unabhängig annehmen. Dies wird auch in dem H1-Detektorsimulationsprogramm H1SIM [26] praktiziert.

5.4 Winkelabhängigkeit von ϵ_{lay}

Aus den Definitionen für ϵ_{lay} und ϵ_{stream} wird deutlich, daß ϵ_{lay} einem Mittelwert der Nachweiswahrscheinlichkeiten $\epsilon_{stream,i}$ der einzelnen Streamerrohre i der Lage gleichkommt, unter der Voraussetzung, daß mindestens ein aktives Rohrvolumen getroffen wurde. Die direkte Bestimmung von $\epsilon_{stream,i}$ für jedes einzelne Streamerrohr scheidet verständlicherweise an der bei konstanten Bedingungen zu geringen Statistik und der Verschleierung durch im Vergleich zur Theorie (siehe unten) zu großen Drahtmultiplizitäten.

Man kann nun aber von der gemessenen Lagennachweiswahrscheinlichkeit ϵ_{lay} rückschließend Aussagen über die mittlere Streamerwahrscheinlichkeit $\bar{\epsilon}_{stream}$ der Rohre einer Lage treffen:

Aus obigen Überlegungen folgt direkt, daß die Lagennachweiswahrscheinlichkeit vom Einfallswinkel nur noch über die Zahl der passierten aktiven Rohrvolumina abhängt, und sich die Bestimmung auf ein zweidimensionales Problem in der Ebene senkrecht zum Draht reduziert. Als Einfallswinkel φ wird im folgenden der Betrag des Winkels definiert, den Spur und Lot auf die Lage einschließen (siehe Abbildung 5.1). Um ϵ_{lay} in Abhängigkeit von ϵ_{stream} ausdrücken zu können, muß die Wahrscheinlichkeit bekannt sein, daß ein unter

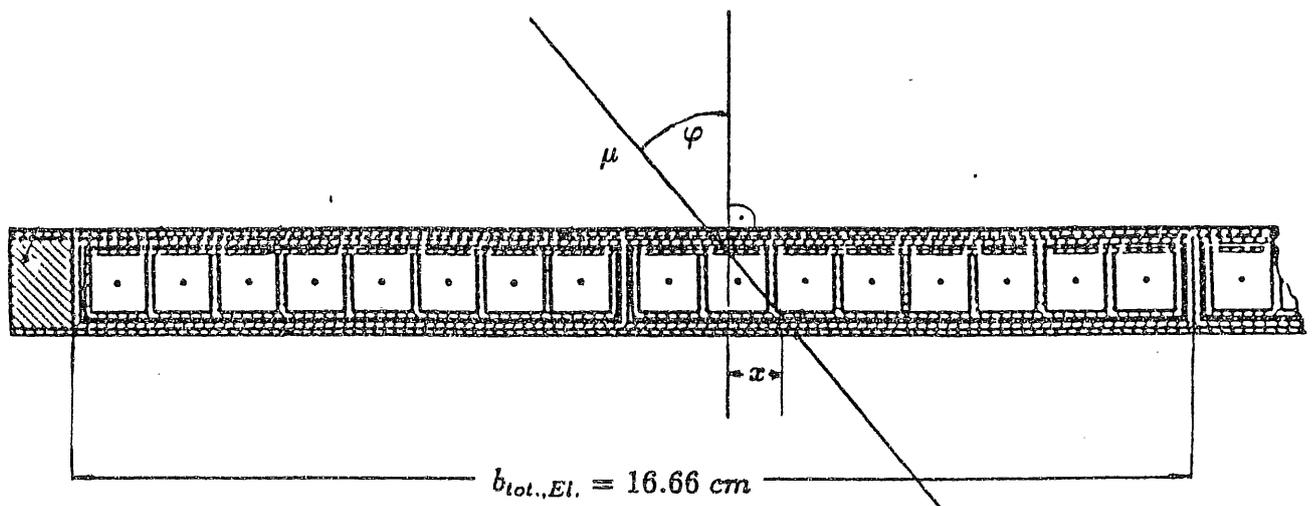


Abbildung 5.1: Reduktion der Bestimmung von ϵ_{lay} auf zwei Dimensionen

dem Winkel φ in die Lage eintretendes Myon aktives Volumen passiert, da die Streamerwahrscheinlichkeit ε_{stream} nur für diesen Fall definiert ist. Diese wird des weiteren als geometrische Nachweiswahrscheinlichkeit der Lage $\varepsilon_{geom}(\varphi)$ bezeichnet. Da auf die im vorigen Kapitel angesprochenen nichtinstrumentierten Dummies in den Barrel-Lagen bei der Analyse korrigiert wird, ergeben sich $\varepsilon_{geom}(\varphi)$ und $\bar{n}(\varphi)$, die gemittelte Zahl der bei einem Eintrittswinkel φ passierten Streamerrohre, folgendermaßen aus Abbildung 5.1: Unter Berücksichtigung der endlichen Dicke der die Rohre trennenden Stege (1mm) ergibt sich ε_{geom} für ein senkrecht durch die Lage fliegendes Myon ($\varphi=0^\circ$) aus dem Quotienten der totalen aktiven Breite $b_{akt.,El.}$ und der totalen Breite $b_{tot.,El.}$ eines Elements:

$$\varepsilon_0 := \varepsilon_{geom}(\varphi=0^\circ) = \frac{b_{akt.,El.}}{b_{tot.,El.}} = \frac{16 \cdot 9.0mm}{166.6mm} = 0.864 .$$

Dieser Wert ist kleiner als 1, da bei kleinen Winkeln φ natürlich auch die Möglichkeit besteht, daß sich ein Myon nur durch einen Steg, nicht aber durch aktives Rohrvolumen bewegt.

Die mittlere Stegbreite (die inaktive Breite pro Draht in einem Element) folgt ebenfalls aus $b_{tot.,El.}$ und $b_{akt.,El.}$:

$$\bar{b}_{Steg} = \frac{b_{tot.,El.} - b_{akt.,El.}}{16} = \frac{166.6mm - 144.0mm}{16} = 1.4mm .$$

Die mittlere Breite \bar{b}_{Rohr} eines der 16 Rohre eines Elementes ist demnach gegeben durch seine aktive Breite $b_{akt.,Rohr}$ und mittlere Stegbreite \bar{b}_{Steg} :

$$\bar{b}_{Rohr} = b_{akt.,Rohr} + \bar{b}_{Steg} = 9.0mm + 1.4mm = 10.4mm .$$

Die Zahl $\bar{n}(\varphi)$ der im Mittel unter einem beliebigen Winkel φ passierten Rohrvolumina ergibt sich aus diesen Größen nach Abbildung 5.1 zu

$$\begin{aligned} \bar{n}(\varphi) &= \frac{b_{akt.,Rohr} + x}{\bar{b}_{Rohr}} = \frac{b_{akt.,Rohr}}{\bar{b}_{Rohr}} + \frac{x}{\bar{b}_{Rohr}} = \\ &= \varepsilon_0 + \frac{b_{akt.,Rohr} \cdot x}{b_{akt.,Rohr} \cdot \bar{b}_{Rohr}} = \varepsilon_0 + \varepsilon_0 \cdot \tan(\varphi) \end{aligned} \quad (5.3)$$

Bis zu einem Grenzwinkel φ_{lim} ist also die Zahl der im Mittel passierten aktiven Volumina und somit auch $\varepsilon_{geom}(\varphi)$ kleiner als 1. Dieser Grenzwinkel ist gegeben durch

$$\tan(\varphi_{lim}) \stackrel{!}{=} \frac{1}{\varepsilon_0} - 1 = \frac{\bar{b}_{Steg}}{\bar{b}_{akt.,Rohr}} ,$$

woraus folgt, daß

$$\varphi_{lim} = 8.9^\circ .$$

Aus diesen Überlegungen folgt für die Wahrscheinlichkeit $\varepsilon_{geom}(\varphi)$, daß ein unter dem Winkel φ in die Lage eintretendes Myon mindestens ein aktives Rohrvolumen passiert :

$$\varepsilon_{geom}(\varphi) = \begin{cases} \bar{n}(\varphi) & , \varphi \leq \varphi_{lim} \\ 1 & , \varphi \geq \varphi_{lim} \end{cases} \quad (5.4)$$

$$= \bar{n}(\varphi) \cdot \Theta(\varphi_{lim} - \varphi) + \Theta(\varphi - \varphi_{lim}) \quad (5.5)$$

Hierbei ist $\Theta(x)$ die Heaviside-Funktion mit

$$\Theta(x) = \begin{cases} 0 & , x \leq 0 \\ 1 & , x > 0 \end{cases} \quad (5.6)$$

Die Graphen der Funktionen $\bar{n}(\varphi)$ und $\epsilon_{geom}(\varphi)$ zeigt Abbildung 5.2.

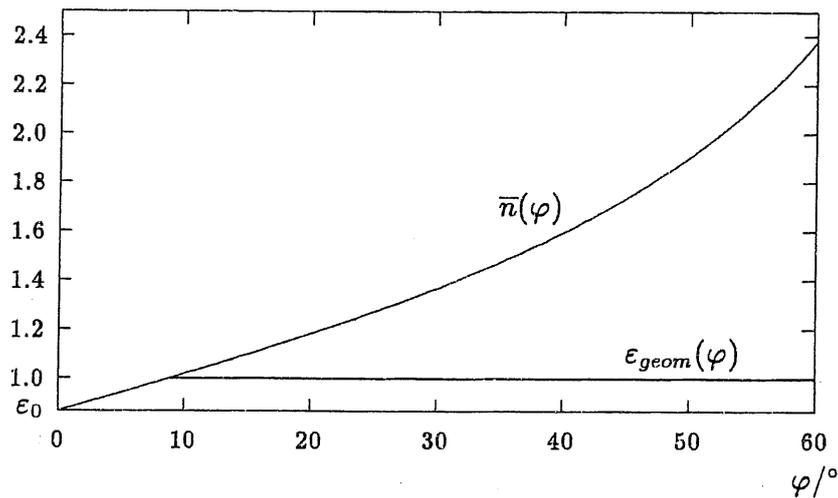


Abbildung 5.2: Abhängigkeit der Zahl \bar{n} der im Mittel passierten aktiven Volumina und der geometrischen Nachweiswahrscheinlichkeit ϵ_{geom} vom Eintrittswinkel φ

Die Abhängigkeit der Lagennachweiswahrscheinlichkeit ϵ_{lay} von φ und der mittleren Streamerwahrscheinlichkeit $\bar{\epsilon}_{stream}$ läßt sich nun folgendermaßen ableiten:

Die Wahrscheinlichkeit ϵ' , daß in *keinem* der $\bar{n}(\varphi)$ aktiven Volumina, die ein unter dem Winkel φ in die Lage eintretendes Myon im Mittel passiert, ein Streamer gesetzt wird, ist gegeben durch

$$\epsilon' = (1 - \bar{\epsilon}_{stream})^{\bar{n}(\varphi)} ,$$

und mit dem Komplement, daß mindestens in einem Rohr ein Streamer gesetzt wird und der Wahrscheinlichkeit $\epsilon_{geom}(\varphi)$, daß das Myon überhaupt ein aktives Volumen passiert, folgt für die Lagennachweiswahrscheinlichkeit ϵ_{lay}

$$\epsilon_{lay}(\varphi) = \epsilon_{geom}(\varphi) \cdot [1 - (1 - \bar{\epsilon}_{stream})^{\bar{n}(\varphi)}] \quad (5.7)$$

Aus der gemessenen Lagennachweiswahrscheinlichkeit ϵ_{lay} läßt sich also umkehrt folgende Aussage über die mittlere Streamerwahrscheinlichkeit der Lage machen:

$$\bar{\epsilon}_{stream} = 1 - \left[1 - \frac{\epsilon_{lay}(\varphi)}{\epsilon_{geom}(\varphi)} \right]^{\frac{1}{\bar{n}(\varphi)}} \quad (5.8)$$

Da die mittlere Streamerwahrscheinlichkeit $\bar{\epsilon}_{stream}$ jeder Lage nicht für jedes Ereignis i separat bestimmt werden kann, da ϵ_{lay} erst am Ende des Bestimmungsalgorithmus ermittelt wird, ist für jedes die Lage k unter einem Winkel φ_{ki} passierende Myon die im Mittel bei diesem Winkel passierte Zahl aktiver Volumina $\bar{n}_k(\varphi_i)$ zu bestimmen, über alle $N_{\mu,pass}$ Ereignisse zu mitteln:

$$\overline{\bar{n}_k(\varphi)} = \left(\sum_{i=1}^{N_{\mu,pass}} \bar{n}_k(\varphi_{ki}) \right) / N_{\mu,pass}$$

und diese Größe dann statt $\bar{n}(\varphi)$ in Gleichung 5.8 einzusetzen, um so die mittlere Streamerwahrscheinlichkeit $\bar{\epsilon}_{stream}$ zu bestimmen.

Durch die notwendige Mittelung ist $\bar{\epsilon}_{stream}$ mit einem Fehler behaftet, der klein ist, falls die Verteilungen der Einfallswinkel schmal bzw. der mittlere Fehler des Mittelwerts $\overline{\bar{n}_k(\varphi)}$ klein ist.

5.5 Voraussetzungen

Zur möglichst genauen Bestimmung der Nachweiswahrscheinlichkeit eines Myons in einer Lage des STS sind aufgrund des bis hierhin dargelegten mindestens folgende Voraussetzungen zu erfüllen:

- Allein zur Unterdrückung statistischer Fehler von ϵ_{lay} unter 1% werden pro Lage nach Gleichung 5.2 bis zu 2500 Ereignisse benötigt. Dies bedeutet entweder die Notwendigkeit einer ausreichend hohen Triggerrate oder eine Datennahme über einen relativ langen Zeitraum.
- Bei den zur Bestimmung von ϵ_{lay} zu verwendenden Ereignissen minimal ionisierender Teilchen (Myonen) sollte eine Identifikation wenn möglich nicht nötig sein.
- Eine Spurbestimmung sollte eindeutig und mit vertretbarem (Rechenzeit-) Aufwand möglich sein. Dies erfordert Ereignisse mit wenig störenden Signalen durch Schauer, etc. im Eisen, ergo kleinen Drahtmultiplizitäten.

Zum ersten Punkt ist zu sagen, daß der Standard-H1-Trigger die Myontrigger-Signal stets nur in Koinzidenz mit Signalen anderer Triggerelemente berücksichtigt (siehe Abbildung 3.4). Zur Bestimmung von ϵ_{lay} hervorragend geeignete Ereignisse kosmischer Myonen, deren Spuren mit einfachen Mitteln rekonstruierbar sind, werden daher (in für die Analyse von Elektron-Proton-Reaktionen zweckmäßiger Weise) unterdrückt.

Zum zweiten ist die Forderung eines zur Spurbestimmung im Eisen notwendigen, von Störsignalen relativ freien Detektors gewöhnlich bei Strahldaten nicht erfüllt, insbesondere nicht in der vorderen Endkappe, in die der Großteil der Reaktionsprodukte der $e p$ -Kollisionen geht, darunter auch vielfach Pionen, die dann (wenn überhaupt) erst im Eisen zerfallen oder hadronische Schauer erzeugen. Ein simuliertes Pion vom Wechselwirkungspunkt in die hintere Endkappe zeigt Abbildung 5.3. Der hier auftretende hadronische Schauer macht das Ereignis für eine Bestimmung der Myon-Nachweiswahrscheinlichkeit im Streamerrohrsystem unbrauchbar. Aus diesen Gründen wurden die Daten für die

Bestimmung von ε_{lay} und generell zur Gesamtkalibration des H1-Eisen-Streamerrohr-Systems mit einem speziellen Kalibrationstrigger für kosmische Myonen genommen, der im folgenden Abschnitt erklärt wird.

5.6 Der Myon-Kalibrationstrigger

Der Kalibrationstrigger für kosmische Myonen ist ein sog. *Stand alone Trigger*, d.h., er *allein* entscheidet ob ein Ereignis zur Weiterverarbeitung gespeichert wird, ungeachtet von Koinzidenzen mit Triggersignalen anderer Detektorkomponenten, die prinzipiell auch ausgeschaltet sein könnten. Die Triggerbedingungen sind folgende:

Grundsätzlich gilt die Modul-Triggerbedingung, daß drei der fünf Triggerlagen ein Myon gesehen haben, die einzige Ausnahme bilden die Oktanten 2 im FBA und BBA, bei denen nur die Myonboxen existieren. Hier genügt zum setzen des Triggersignals schon, daß Lage 13 und 14 ein Myon gesehen haben.

Im Barrel werden nun in Koinzidenz Triggersignale aus zwei Modulen in zwei verschiedenen Oktanten des selben Subdetektors gefordert. In dem Triggerwort der BOS-Bank TLV1 (Trigger Level 1 Subtrigger Bits and related) sind jeweils vier Bits für Vorwärts- und Rückwärtsbarrel reserviert. Für die Endkappen genügt allein die Erfüllung der Be-

Bit	Triggerbedingung (Modulnummern $N_{Modul, Subdet}$)	Einfallswinkel φ
0	FBA: $(3 \vee 4) \wedge (11 \vee 12)$	$0^\circ - 22.5^\circ$
1	$[(5 \vee 6) \wedge (13 \vee 14)] \vee [(1 \vee 2) \wedge (9 \vee 10)]$	$0^\circ - 22.5^\circ$
2	$(0 \vee 15) \wedge (7 \vee 8)$	$0^\circ - 22.5^\circ$
3	$(2 \vee 5) \wedge (11 \vee 12)$	ca. $0^\circ - 45^\circ$
4	BBA: $(3 \vee 4) \wedge (11 \vee 12)$	$0^\circ - 22.5^\circ$
5	$[(5 \vee 6) \wedge (13 \vee 14)] \vee [(1 \vee 2) \wedge (9 \vee 10)]$	$0^\circ - 22.5^\circ$
6	$(0 \vee 15) \wedge (7 \vee 8)$	$0^\circ - 22.5^\circ$
7	$(2 \vee 5) \wedge (11 \vee 12)$	ca. $0^\circ - 45^\circ$

Tabelle 5.1: Bedingungen des Kalibrationstriggers für die Barrelmodule

dingung Trigger vorn *und* Trigger hinten, was in Bit 23 des Triggerwortes 0 festgehalten wird. Offensichtlich schafft der Kalibrationstrigger die Voraussetzungen für eine Analyse in der Form, wie sie oben als optimal beschrieben wurde:

- Der Detektor ist bis auf die Spur des getriggerten Myons frei von störenden Signalen (hadronische Schauer etc.), so daß die Myonspur ohne großen Aufwand relativ genau bestimmbar ist.
- Die Myonspuren schneiden keine nichtinstrumentierten Räume zwischen zwei Subdetektoren, die bei einer zweidimensionalen Analyse verborgen blieben, da die Drahtlängen innerhalb eines Moduls konstant sind (dies gilt mit Ausnahmen, auf die an geeigneter Stelle noch eingegangen wird).
- Die Spur eines Myons mit dem Impuls p_μ im homogenen Magnetfeld der H1-Spule ist eine Helix mit dem Krümmungsradius R und dem Anstiegswinkel α wobei folgende

Beziehung gilt [2]:

$$p_\mu \cos \alpha = k \cdot B \cdot R \quad \text{mit } k = \frac{0.3 \cdot \text{GeV}}{T \cdot m}.$$

Wenn das Myon im Barrel triggert, erfüllt es (abgeschätzt) zwei Bedingungen (siehe Abbildung 5.4):

$$\tan \alpha \leq \frac{855 \text{cm}}{452 \text{m}} = 1.892 \quad \wedge \quad R \geq 600 \text{cm}$$

Daraus folgt als Abschätzung für den Myonimpuls bei $B = 1.14 \text{T}$

$$p_\mu \geq 4 \text{GeV}$$

Hierbei ist der Energieverlust im Innern des Detektors (Spule, Kalorimeter) nicht berücksichtigt. Daher ist in einem Spurabschnitt der Länge der Dicke eines Moduls in der Ebene senkrecht zur Drahtrichtung ein Geradenfit der Spur durchaus legitim.

Aus der Triggerung der zur Bestimmung der Lagennachweiswahrscheinlichkeit vorgesehenen Ereignisse kosmischer Myonen mit fünf bestimmten Lagen ergeben sich nun verständlicherweise systematische Differenzen zwischen gemessener und wahrer Nachweiswahrscheinlichkeit dieser Triggerlagen, die im folgenden quantitativ hergeleitet werden. Ferner dürften die aus den zu bestimmenden Lagen-Nachweiswahrscheinlichkeiten ε_{lay} rekonstruierten Streamerwahrscheinlichkeiten $\bar{\varepsilon}_{stream}$ aufgrund der erwarteten Eintrittswinkel der Myonen in die Lagen nur geringfügig kleiner sein als die ε_{lay} .

5.7 Multiplizitäten

Eine Größe, die wesentlich zur Auflösung der zu rekonstruierenden Spur eines Myons und damit auch zur Präzision der Bestimmung von ε_{lay} beiträgt, ist die Zahl der pro Ereignis und Lage getroffen gemeldeten Drähte, die Drahtmultiplizität in den Lagen. Die Problematik dieser Größe besteht darin, dass sie oft größer ist, als Gleichung 5.3 theoretisch vorhersagt. Dies kann folgende Gründe haben:

- Ein Rekombinationsphoton aus dem vom Myon gesetzten Streamer setzt in einem Nachbarrohr durch Photoeffekt an dessen Kammerwand einen Streamer, der dazu führt, dass dieser Draht bei der Auslese ebenfalls als getroffen erkannt wird.
- Bei der Ionisation eines Zählgasatoms durch ein höherenergetisches Myon erhält das Ionisationselektron soviel Energie, daß es das Zählvolumen verläßt und in einem Nachbarrohr einen Streamer setzt, der ebenfalls ein Treffersignal nach sich zieht.
- Durch elektronisches Übersprechen (*Crosstalk*) in den Ausleseeinheiten *scheinen* ein oder mehrere Nachbardrähte des vom Myon getroffenen Drahtes ebenfalls getroffen.

Bei Berücksichtigung dieser Punkte in Monte-Carlo-Simulationen von Myonen im H1-Detektor (H1SIM) sind die resultierenden Drahtmultiplizitäten zwar immer noch kleiner als mit realen Daten gemessen, jedoch nicht signifikant. Abbildung 5.5 zeigt die Drahtmultiplizitäten pro Lage größer 0 für simulierte und reale kosmische Myonen, die unter

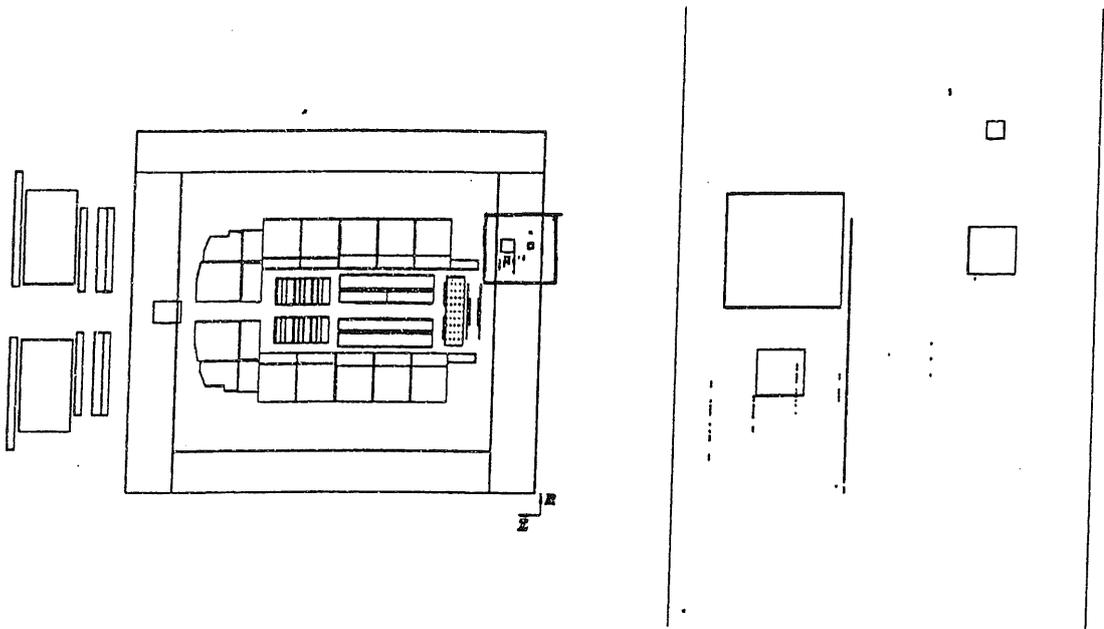


Abbildung 5.3: Hadronischer Schauer durch ein simuliertes Pion.

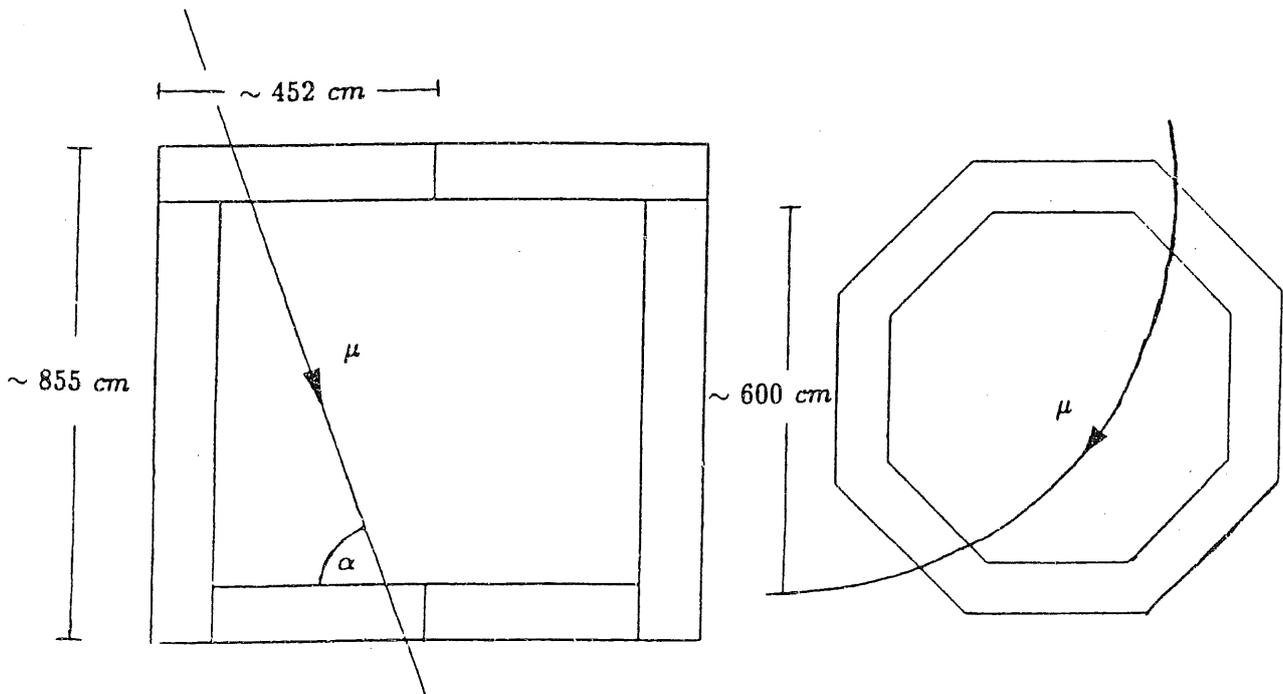


Abbildung 5.4: Abschätzung des Impulses der zur Bestimmung der Nachweiswahrscheinlichkeit der Streamerrohrlagen verwendeten Myonen: Länge der Drähte im Barrel $l \approx 452 \text{ cm}$, Durchmesser des Barrels $2r \approx 855 \text{ cm}$

Winkeln $|\varphi| \leq 22.5^\circ$ in eine Lage eintreten, wie sie auch vom Myon-Kalibrationstrigger genommen werden. Der Anteil der Ereignisse pro Lage mit Drahtmultiplizitäten größer 2, die in der Simulation nicht auftreten, ist bei den realen Daten kleiner als 1.5%. Die Effekte, die zu größeren Multiplizitäten führen als geometrisch erwartet, sind also recht gut verstanden, oder zumindest quantitativ gut simuliert.

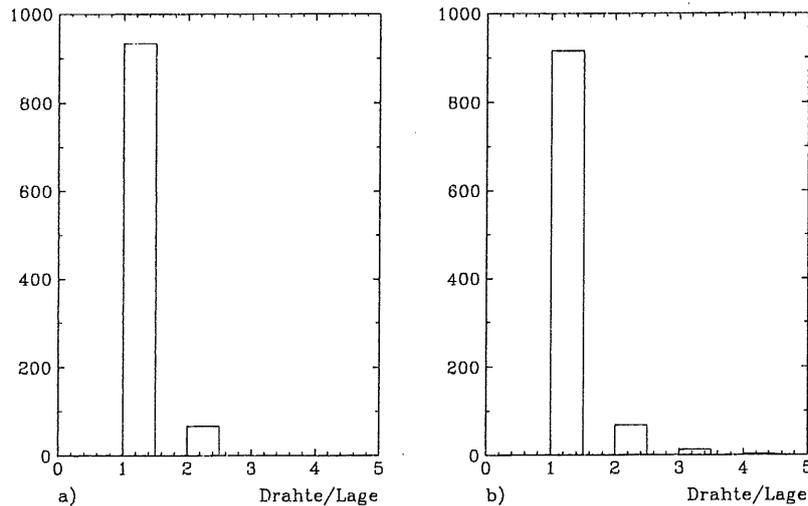


Abbildung 5.5: Drahtmultiplizitäten bei jeweils 1000 unter Winkeln $0^\circ \leq \varphi \leq 22.5^\circ$ in die Lage eintretenden a) simulierten und b) realen kosmischen Myonen pro Lage

In der offiziellen H1-Ereignis-Rekonstruktionssoftware (H1REC) werden bei Multiplizitäten größer 1 die Drähte zu einem sog. *Drahtcluster* zusammengefaßt und die Koordinaten der zum Cluster gehörenden Drähte gemittelt. Dies erschien bei dem Problem der Bestimmung der Nachweiswahrscheinlichkeiten der Kammern aufgrund der gewählten Toleranzen (siehe Kapitel 6) nicht nötig.

5.8 Systematische Fehler der Nachweiswahrscheinlichkeit der Triggerlagen

Aufgrund der oben beschriebenen Bedingungen des Kalibrationstriggers sei zunächst angenommen, daß die Myonen in den zur Bestimmung der Lagen-Nachweiswahrscheinlichkeit analysierten Ereignissen meist alle fünf Triggerlagen eines Moduls passieren. Betrachtet man jeweils eine der wahren Nachweiswahrscheinlichkeiten $\varepsilon_{lay,i}$ ($i \in 3, 4, 5, 8, 12$) der fünf Triggerlagen eines Moduls und nimmt man an, daß die Streuung der $\varepsilon_{lay,j}$ der vier jeweils *nicht* betrachteten Triggerlagen j um ihren Mittelwert $\bar{\varepsilon}$ nicht zu groß ist, so lassen sich die Differenzen zwischen wahrer und gemessener Nachweiswahrscheinlichkeit der Triggerlagen in Abhängigkeit von $\bar{\varepsilon}$ und der Wahrscheinlichkeit für einen Modultrigger ε_{trig} berechnen: Die Wahrscheinlichkeit $\varepsilon_{k|l}$, daß von k passierten Triggerlagen genau l Lagen

getroffen gemeldet werden, ist nach den Gesetzen der Statistik gegeben durch

$$\varepsilon_{k|l}(\bar{\varepsilon}) = \binom{k}{l} \bar{\varepsilon}^l (1 - \bar{\varepsilon})^{(k-l)} .$$

Demnach ist die Wahrscheinlichkeit, daß bei k passierten Triggerlagen *mindestens* l Triggerlagen getroffen gemeldet werden, gegeben durch

$$\varepsilon_{k|\geq l}(\bar{\varepsilon}) = \sum_{n=l}^k \binom{k}{n} \bar{\varepsilon}^n (1 - \bar{\varepsilon})^{(k-n)} . \quad (5.9)$$

Sei $\varepsilon_{lay,x}$ die *wahre* Nachweiswahrscheinlichkeit der untersuchten Triggerlage x , so ist die Wahrscheinlichkeit $\varepsilon_{treff,x}$, diese Lage getroffen zu *beobachten* gemäß der Modultrigger-Bedingung „3 aus 5“ gekoppelt mit der Forderung, daß von den restlichen vier Triggerlagen mindestens zwei zusätzlich getroffenen sind.

$$\begin{aligned} \varepsilon_{treff,x} &= \varepsilon_{lay,x} \cdot \varepsilon_{4|\geq 2}(\bar{\varepsilon}) \\ &= \varepsilon_{lay,x} \cdot \left[\binom{4}{2} \bar{\varepsilon}^2 (1 - \bar{\varepsilon})^2 + \binom{4}{3} \bar{\varepsilon}^3 (1 - \bar{\varepsilon}) + \binom{4}{4} \bar{\varepsilon}^4 \right] = \\ &= \varepsilon_{lay,x} \cdot [6 \bar{\varepsilon}^2 (1 - \bar{\varepsilon})^2 + 4 \bar{\varepsilon}^3 (1 - \bar{\varepsilon}) + \bar{\varepsilon}^4] \end{aligned} \quad (5.10)$$

Die Modultrigger-Wahrscheinlichkeit $\varepsilon_{trig.}$ erhält man unter zusätzlicher Berücksichtigung der Fälle, in denen Lage x *nicht* getroffen gemeldet wurde, also mindestens drei der nicht untersuchten vier Triggerlagen getroffen gemeldet wurden:

$$\begin{aligned} \varepsilon_{trig.} &= \varepsilon_{treff,x} + (1 - \varepsilon_{lay,x}) \varepsilon_{4|\geq 3}(\bar{\varepsilon}) \quad (5.11) \\ &= \varepsilon_{treff,x} + (1 - \bar{\varepsilon}) \left[\binom{4}{3} (1 - \bar{\varepsilon}) \bar{\varepsilon}^3 + \binom{4}{4} \bar{\varepsilon}^4 \right] = \\ &= \varepsilon_{treff,x} + (1 - \bar{\varepsilon}) [4 (1 - \bar{\varepsilon}) \bar{\varepsilon}^3 + \bar{\varepsilon}^4] \end{aligned} \quad (5.12)$$

Die *gemessene* Nachweiswahrscheinlichkeit $\varepsilon_{mess,x}$ der Lage x ergibt sich demnach als Quotient aus $\varepsilon_{treff,x}$ und $\varepsilon_{trig.}$, also dem Bruchteil der Ereignisse, in denen Lage x getroffen gemeldet wurde, von allen Ereignissen, die ein Modultrigger-Signal nach sich zogen:

$$\begin{aligned} \varepsilon_{mess,x} &= \frac{\varepsilon_{treff,x}}{\varepsilon_{trig.}} = \frac{\varepsilon_{lay,x} \cdot \varepsilon_{4|\geq 2}(\bar{\varepsilon})}{\varepsilon_{lay,x} \cdot \varepsilon_{4|\geq 2}(\bar{\varepsilon}) + (1 - \varepsilon_{lay,x}) \cdot \varepsilon_{4|\geq 3}(\bar{\varepsilon})} \\ &= \frac{\varepsilon_{4|\geq 2}(\bar{\varepsilon})}{\varepsilon_{4|\geq 2}(\bar{\varepsilon}) + \frac{1 - \varepsilon_{lay,x}}{\varepsilon_{lay,x}} \varepsilon_{4|\geq 3}(\bar{\varepsilon})} \end{aligned} \quad (5.13)$$

Die gemessene Nachweiswahrscheinlichkeit der untersuchten Triggerlagen hängt also nicht nur von der wahren, sondern auch wesentlich von der (mittleren) Nachweiswahrscheinlichkeit der anderen Triggerlagen ab.

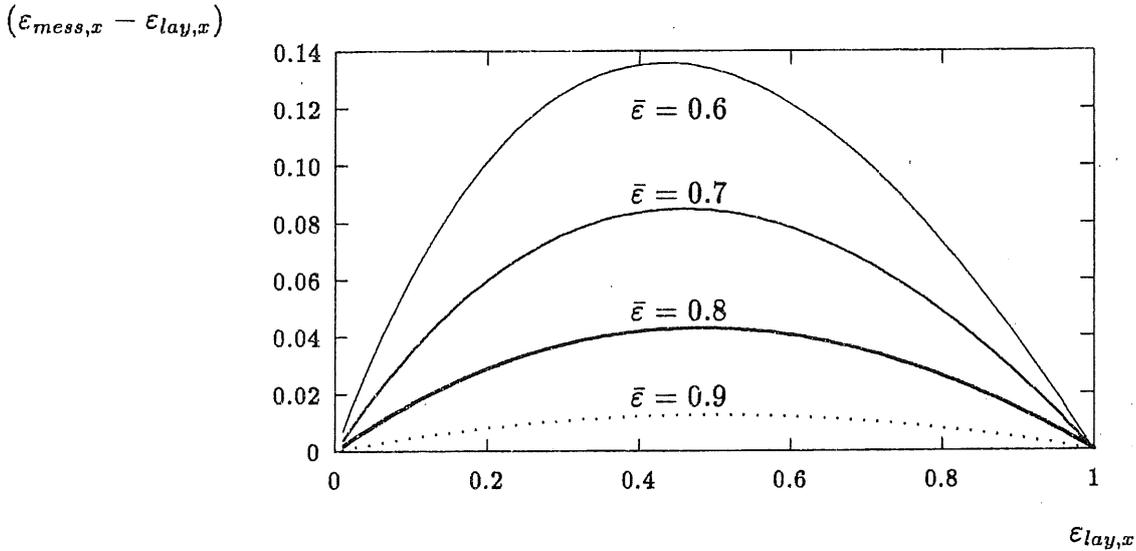


Abbildung 5.6: Die Abweichung der gemessenen Nachweiswahrscheinlichkeit $\varepsilon_{x,mess}$ einer Triggerlage x in Abhängigkeit ihrer wahren und der gemittelten Nachweiswahrscheinlichkeit der übrigen vier Triggerlagen $\bar{\varepsilon}$

Abbildung 5.6 zeigt den systematischen Fehler $(\varepsilon_{mess,x} - \varepsilon_{lay,x})$ als Funktionenschar von $\varepsilon_{lay,x}$ mit Scharparametern $\bar{\varepsilon} \in \{0.6, 0.7, 0.8, 0.9\}$. Abweichend von obiger Annahme, es triggerten ausschließlich Myonen, die in den Modulen, die dann das Triggersignal lieferten, alle fünf Triggerlagen passierten, werden aber auch Myonen gesehen, die aufgrund nichtinstrumentierter Bereiche in den Lagen weniger als fünf Triggerlagen passieren oder in einem der Module z.B. nur zwei Triggerlagen (v.a. die Lagen 12 und 8) passieren, dann in das Nachbarmodul (im selben Oktanten) eintreten und dort in den Lagen 3, 4 und 5 erst triggern. Die Spur eines solchen Myons, das als „Edge Crosser“ bezeichnet wird, skizziert Abbildung 5.7. In diesen Fällen gilt

$$\varepsilon_{mess,x} = \varepsilon_{lay,x} \cdot \varepsilon_{2|2}(\bar{\varepsilon}) = \varepsilon_{lay,x} \cdot \bar{\varepsilon}^2 = \varepsilon_{trig}.$$

d.h. man mißt als Nachweiswahrscheinlichkeit $\varepsilon_{mess,x}$ der Triggerlagen in solchen Ereignissen stets 1, unabhängig von der wahren Nachweiswahrscheinlichkeit ε_x und der mittleren Nachweiswahrscheinlichkeit $\bar{\varepsilon}$ der nicht untersuchten Triggerlagen. Diese Ereignisse können also maßgeblich für eine Differenz zwischen $\varepsilon_{mess,x}$ und $\varepsilon_{lay,x}$ größer als nach Gleichung 5.14 erwartet verantwortlich gemacht werden. Abbildung 5.8 zeigt die Nachweiswahrscheinlichkeiten der Eisenlagen eines Moduls, deutlich zu erkennen der oben erklärte systematische Unterschied der ε_{lay} der Trigger- und Nichttriggerlagen, der in diesem Fall im Mittel bei ca. 4 % liegt. Dies bedeutet, daß bei diesen gemessenen Nachweiswahrscheinlichkeiten eine nicht unerhebliche Zahl „Edge Crosser“ und Myonen, die aufgrund nichtinstrumentierter Bereiche weniger als fünf Triggerlagen passieren, zur Bestimmung der Nachweiswahrscheinlichkeit beiträgt. Zur „Edge Crosser“-Wahrscheinlichkeit siehe auch [29].

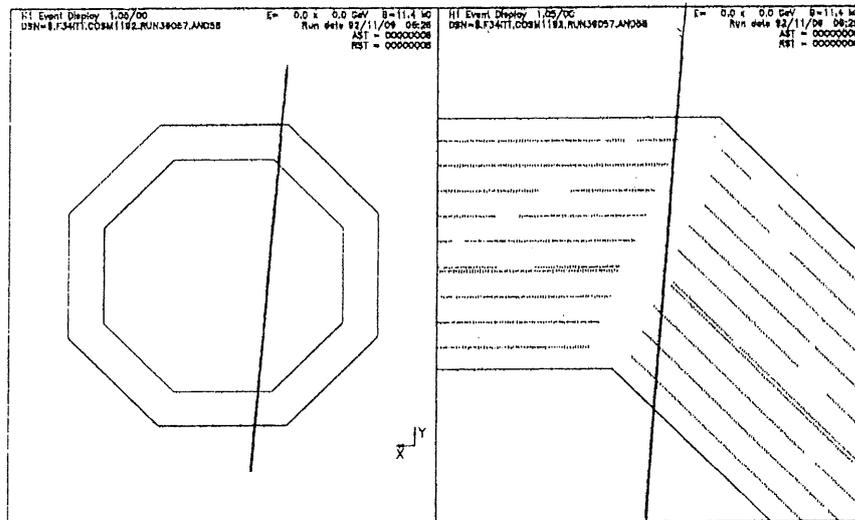
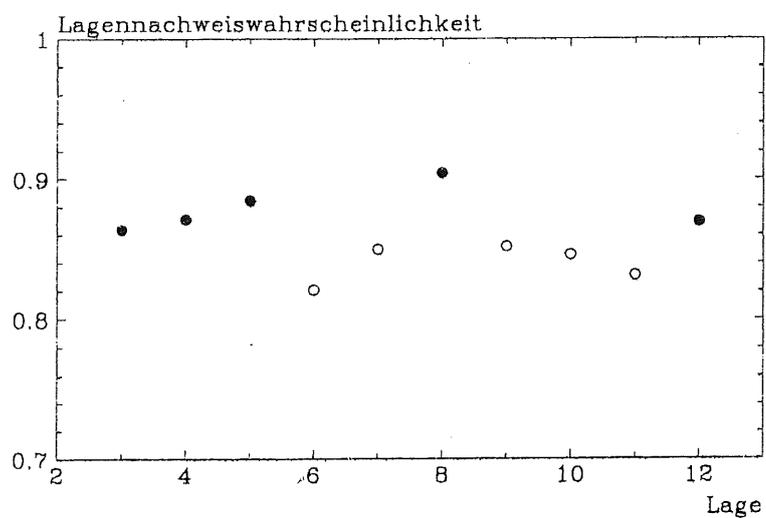


Abbildung 5.7: Beispiel für die Spur eines „Edge Crosser“-Myons

Abbildung 5.8: Nachweiswahrscheinlichkeiten ε_{Lage} der Lagen von Modul 44, bestimmt aus 81044 Ereignissen von Run 36057/58 bei $B = 1.14 T$, (●) Triggerlagen, (○) Nichttriggerlagen.

Kapitel 6

Das Analysepaket IWILEF

Grundlage aller in dieser Arbeit gemachten Untersuchungen sind die in der IRWE-Bank jedes Ereignisses festgehaltenen Modul- und Kanalnummern der getroffenen Drähte. Aus diesen Angaben wird in der Routine IDCDW unter Zuhilfenahme der H1-Datenbasis (resp. der Geometriebänke IGWI, IGWO, IGWY [23]) die Bank IWCR (Iron Wire Coordinate Reconstruction) erstellt, in die folgende Informationen über die getroffenen Drähte gefüllt werden:

```
!      BANKname BANKtyp      ! Kommentare
!
TABLE  IWCR                  ! Iron_Wire_Coordinates_Reconstruction
!                             ! parallele Bank zu IRWE
!  ATTRIBUTE:
!  -----
! COL ATT-Name FMT Min      Max ! Kommentare
!
1  Module      I    0        63 ! Modulnummer
2  Layer       I    0        15 ! Lagenummer
3  X           F                    ! x-Koordinate der Mitte des Drahtes
4  Y           F                    ! y-Koordinate der Mitte des Drahtes
5  Z           F                    ! z-Koordinate der Mitte des Drahtes
6  DX          F                    ! Halbe x-Ausdehnung des Drahtes
7  DY          F                    ! Halbe y-Ausdehnung des Drahtes
8  DZ          F                    ! Halbe z-Ausdehnung des Drahtes
9  Radius      F                    ! R in x-y Ebene
10 Phi         F    0.      2 PI ! Azimuthwinkel
```

Bei der Bestimmung der Nachweiswahrscheinlichkeit der Streamerrohrlagen werden ausschließlich die Informationen aus der IWCR-Bank verwendet, es sei denn es werden besondere Triggerbedingungen gestellt, deren Erfüllung anhand der TLV1-Triggerbank überprüft wird.

6.1 Die Philosophie

Da es den Rahmen dieser Arbeit sprengte, die Funktionsweise des gesamten Programmpakets IWILEF Schritt für Schritt anhand des Quellcodes zu erklären und in Kapitel 8 die Steuerung und die Benutzung noch einmal beschrieben sind, genüge es an dieser Stelle, nur die Prinzipien und die grundsätzliche Realisierung der Bestimmung der Nachweiswahrscheinlichkeit der Streamerrohrlagen auszuführen, um im nächsten Kapitel dann Anwendungsmöglichkeiten und erste Ergebnisse vorzustellen.

- In dem Programmpaket IWILEF werden die Streamerrohrlagen nur solange zusammen betrachtet, wie sie sich in demselben Oktanten im selben Subdetektor befinden. In den Endkappen wurden die Oktanten dazu durch folgende Zuordnungen definiert:

Oktant 0	:=	Modul	0	+	Modul	2
Oktant 1	:=	Modul	1	+	Modul	3
Oktant 2	:=	Modul	4	+	Modul	6
Oktant 3	:=	Modul	5	+	Modul	7
Oktant 4	:=	Modul	8	+	Modul	10
Oktant 5	:=	Modul	9	+	Modul	11
Oktant 6	:=	Modul	12	+	Modul	14
Oktant 7	:=	Modul	13	+	Modul	15

Tabelle 6.1: Definition der Oktanten in den Endkappen

- In den Oktanten soll jeweils die Spur des passiertern Myons erkannt und in der Ebene senkrecht zum Draht rekonstruiert werden.
- Zwischen der innersten und der äußersten getroffenen Lage eines Oktanten wird überprüft, ob getroffen gemeldete Drähte akzeptabel nah an der rekonstruierten Spur liegen und nicht getroffen gemeldete Lagen aufgrund mindestens eines passiertern aktiven Volumens ein Signal hätten setzen können.
- Die Zahl der Ereignisse, bei denen eine spezielle Lage passiert wurde bzw. auch getroffen gemeldet wurde, wird für jede Lage getrennt gezählt. Hieraus wird prinzipiell die Nachweiswahrscheinlichkeit nach Gleichung 5.34 berechnet.
- Aus dem Winkel der rekonstruierten Spur zum Lot auf die Lagen wird die mittlere Zahl der passiertern aktiven Volumina berechnet und über alle berücksichtigten Ereignisse für jede Lage einzeln aufsummiert. Daraus wird schließlich der mittlere Winkel, unter dem die Lage passiert wurde, zurückgerechnet und zusammen mit der berechneten Lagen-Nachweiswahrscheinlichkeit ϵ_{lay} die mittlere Streamerwahrscheinlichkeit $\bar{\epsilon}_{Streamer}$ berechnet.

6.2 Die Realisierung

Nach Einlesen der Ereignisse können in der Triggeroutine IWLFTRG bei Bedarf durch Forderung spezieller Triggerbits besondere Ereignisse selektiert werden, so zum Beispiel Myonen in speziellen Modulen. In der eigentlichen Bestimmungsroutine IWILEF wird nach Initialisierung einiger Felder und Histogramme dann direkt nach Kandidaten für Spuren im Eisen gesucht.

6.2.1 Spurerkennung

In der eigentlichen Spurerkennungsroutine FDTRCK (FinD TRaCK) [24] wird ausgehend vom ersten getroffenen Draht in der IWCR-Bank jeweils der räumliche Abstand D_{Draht} der *Mittelpunkte* zweier getroffen gemeldeter Drähte mit aufeinanderfolgenden Indizes i und $i + 1$ in der IWCR-Bank bestimmt und entschieden, ob diese so nah beieinander liegen, daß sie demselben Spurstück, *Segment* genannt, zugeordnet werden können (siehe Abbildung 6.1). Die Wahl des Abstandes $D_{\text{Draht,max}}$, bei dem zwei getroffene Drähte noch

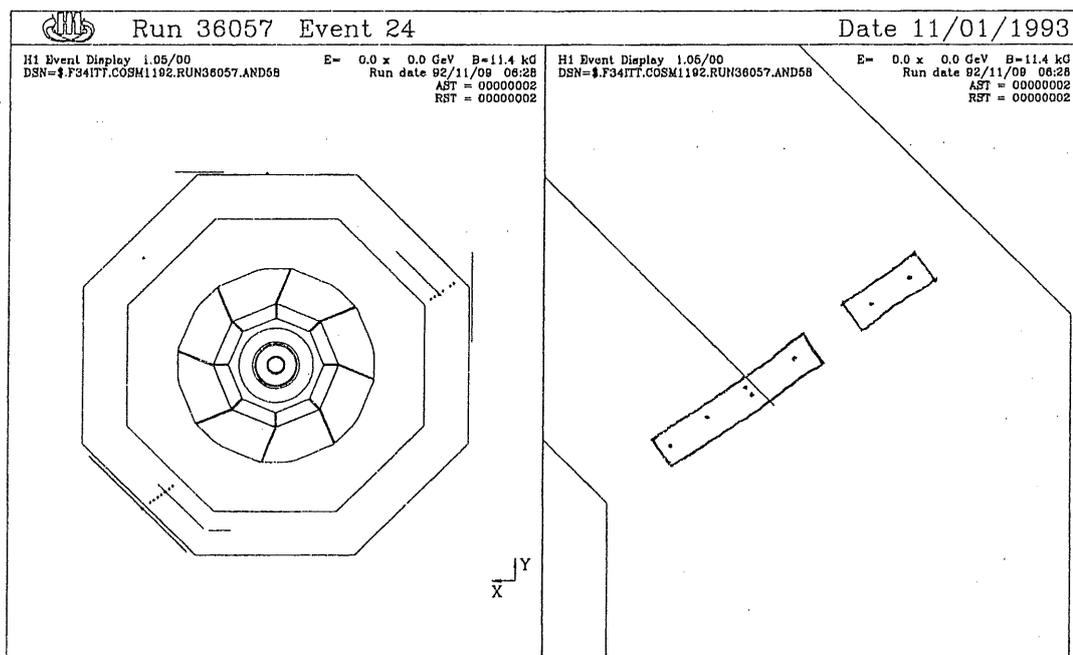


Abbildung 6.1: Veranschaulichung der Spurkandidatenfindung

demselben Segment zugeordnet werden, fällt leicht, wenn man sich die Verteilung der Abstände D_{Draht} betrachtet (Abbildung 6.2):

Der Peak bei Abständen kleiner als 10cm rührt von Multiplizitäten größer eins in den Lagen aus im vorigen Kapitel beschriebenen Ursachen, der zweite Peak bei ca. $10 - 15\text{cm}$ zeigt die Vielzahl der Fälle, in denen zwei *benachbarte* Lagen getroffen wurden, der nächste

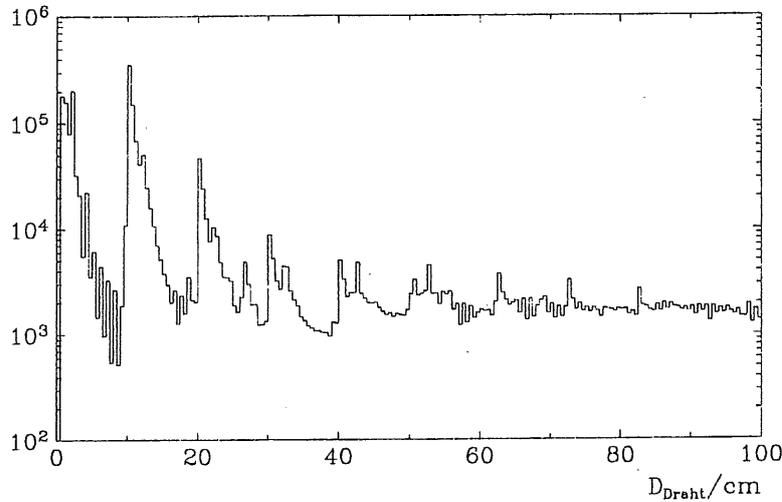


Abbildung 6.2: Verteilung der Abstände D_{Draht} der Mitten zweier getroffener Drähte bei 81044 Ereignissen aus Run 36057/58.

Peak bei ca. 25 – 30cm zeigt die Fälle, in denen zwei getroffene Lagen durch eine nicht-getroffene getrennt werden usw. Der maximal tolerierte Abstand zweier benachbarter getroffener Drähte, die zu einem Segment gehören sollen, wurde so zu $D_{Draht,max} = 30cm$ gewählt. Dies ist etwa der Abstand zweier Lagen n und $n + 2$, daher ist eine kleinere Wahl für $D_{Draht,max}$ nicht sinnvoll. Die Nachweiswahrscheinlichkeit der Myonboxen kann daher nur bestimmt werden, sofern diese aufgrund der Länge der in ihnen installierten Drähte obige Bedingung erfüllen. Ansonsten wäre eine Information über die dritte Koordinate der in den Kammern gesetzten Streamer notwendig. Da diese jedoch nur durch die Strips geliefert werden könnte, die nur *Influenzelektroden* sind, wäre die so bestimmte Nachweiswahrscheinlichkeit ohnehin mit einem nicht vertretbaren systematischen Fehler nach oben behaftet.

Sind die Mitten zweier Drähte mit den Indizes j und $j + 1$ in der IWCR-Bank voneinander weiter entfernt als $D_{Draht,max}$, so wird mit dem Draht mit dem Index $j + 1$ ein neues Segment begonnen und zu diesem nun Kandidaten hinzugesucht.

Sind alle getroffenen Drähte einem Segment zugeordnet, werden in allen Segmenten jeweils die Treffer der innersten und äußersten getroffenen Lagen bestimmt und damit die Abstände zu den extremen Treffern der anderen Segmente, also die Abstände $D_{Seg.}$ der Segmente untereinander berechnet. Abbildung 6.3 zeigt die Verteilung der Abstände zweier Segmente. Ist dieser Abstand kleiner als $D_{Seg.,max} = 40cm$, so werden beide zu einem Super-Segment vereinigt. Dies entspricht dem Abstand zweier Lagen n und $n + 3$, daher ist auch hier eine Wahl $D_{Seg.,max} < 40cm$ nicht sinnvoll, da $D_{Seg.,max}$ doch größer als $D_{Draht,max}$ sein sollte. Die Auswirkungen der Wahl von $D_{Draht,max}$ und $D_{Seg.,max}$ auf die Bestimmung der Nachweiswahrscheinlichkeit betragen für $D_{Draht,max} \geq 30cm$ und $D_{Draht,max} < D_{Seg.,max} \leq 40cm$ maximal weniger als 1% und seien deshalb im folgen-

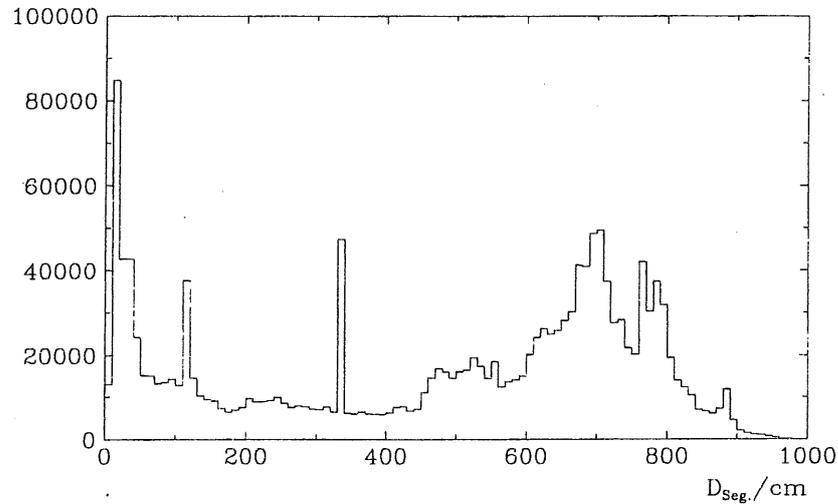


Abbildung 6.3: Verteilung der Abstände zweier Segmente (Run 36057/58, $B = 1.14 T$)

den nicht weiter berücksichtigt. Die Häufung bei Abständen $D_{Seg.} \approx 700 \text{ cm}$ rührt von den Kalibrationstrigger-Bedingungen, die in zwei *gegenüberliegenden* Oktanten desselben Subdetektors einen Modultrigger fordern. Der scharfe Peak bei Abständen $D_{Seg.}$ von ca. 110 cm rührt von Segmenten in Myonboxen im (am) Barrel, die sich, durch das Eisen getrennt, gegenüberliegen (z.B. die innere Myonbox 29 und die äußere Myonbox 46). Der Peak bei $D_{Seg.} \approx 330 \text{ cm}$ rührt von Segmenten in inneren Myonboxen, die sich über den gesamten Barrel erstrecken (z.B. die innere Myonbox 19) und außerhalb dieser liegenden Segmenten im Eisen des vorderen oder hinteren Teil des Barrels. Nachdem von diesen vorläufigen Segmenten wiederum die Informationen minimale und maximale getroffene Lagenummer und die Zahl der im Segment zusammengefaßten getroffenen Drähte gesammelt wurden, wird anhand eines Qualitätskriteriums entschieden, ob die Daten eines Segmentes der weiteren Analyse zur Verfügung gestellt werden oder nicht. Ist die minimale Lagenummer im Segment größer gleich 13 oder die maximale Lagenummer kleiner gleich 2, handelt es sich also um ein reines Myonboxsegment, so erhält dieses die Qualität $Q = 0$! Ansonsten wird als Qualität des Segmentes der Quotient der Differenz aus maximaler und minimaler getroffener Lagenummer N_{max} und N_{min} , also der Zahl der mindestens passierten Lagen und der Zahl der getroffenen Drähte $n_{Drähte}$ im Segment definiert. Diese Größe entspricht also grob dem Inversen der mittleren Drahtmultiplizität der passierten Lagen.

$$Q = \frac{N_{max} - N_{min}}{n_{Drähte}} \quad (6.1)$$

Eine Verteilung der so bestimmten Qualitäten der einzelnen Segmente zeigt Abbildung 6.4. Die darin auftretenden diskreten Peaks erklären sich wie folgt:

Der Peak bei $Q = 1$ steht für die vielen Ereignisse, in denen die Zahl der getroffenen Drähte genau um 1 kleiner ist als die Zahl der mindestens passierten Lagen. Das vielfache

Auftreten dieses Falles ist bei einer Nachweiswahrscheinlichkeit der Lagen von etwa 80% auch plausibel. Zudem ist dieser Fall auch kombinatorisch am wahrscheinlichsten. Die Ursache für Qualitäten Q größer als 1 ist natürlich die Tatsache, daß die untersuchten Myonkammern keine Nachweiswahrscheinlichkeit von 100% besitzen und daher die Zahl der passierten Lagen oft größer ist, als die Zahl der getroffen gemeldeten Drähte. Die Lücken in der Verteilung rühren von der Tatsache, daß Q aufgrund seiner Definition eine *rationale* Zahl ist und so zum einen nicht jedes Bin gefüllt wird, zum anderen aus kombinatorischen Gründen bei 10 betrachteten Eisenlagen einige Qualitäten häufiger angenommen werden. So erhalten z.B. die Qualität $Q = \frac{1}{2}$ vor allem Segmente mit zwei getroffenen Drähten in zwei benachbarten Lagen. Zur Weiterverarbeitung genüge die Erfüllung der Forderung $Q > 0$, da jede höhere Forderung systematisch eine höhere Nachweiswahrscheinlichkeit liefern würde.

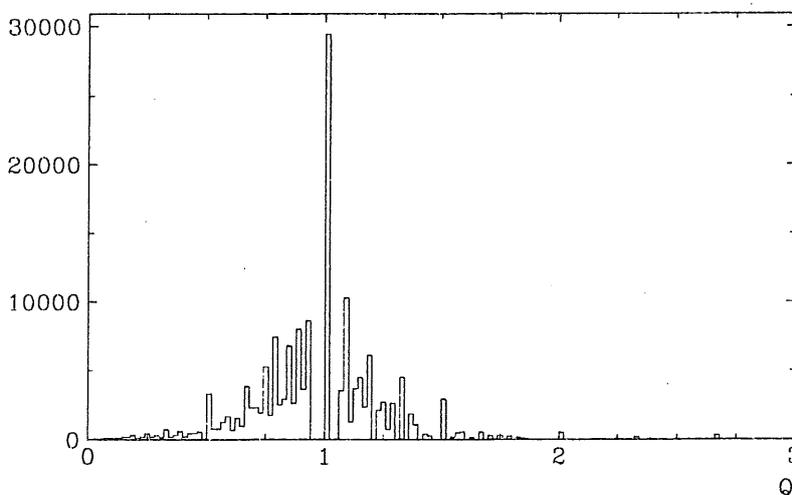


Abbildung 6.4: Verteilung der Qualität Q der Spurkandidaten bei 81044 Ereignissen aus Run 36057/58 ($B = 1.14 T$)

6.2.2 Spurrekonstruktion

Aufgrund der in einem Oktanten (weitgehend) konstanten Drahtlänge ist eine zweidimensionale Analyse in der Ebene senkrecht zum Draht möglich. Zur Spurrekonstruktion werden nur getroffene Drähte der Eisenlagen herangezogen, aufgrund der geometrisch nicht wohldefinierten Verhältnisse für die Myonboxen, gerade die Drahtlänge betreffend, und nur, falls im Oktanten nicht mehr als 40 Drähte getroffen gemeldet wurden, was bei zwölf passierten Lagen einer akzeptierten maximalen mittleren Drahtmultiplizität pro Lage von ca. 3 Drähten entspricht. Dabei bleiben sog. „noisy“ Dähte, die permanent rauschen durch eine zusätzliche Abfrage unberücksichtigt.

Die Rekonstruktion geschieht in dem Koordinatensystem, in dem die Lagen parallel zur

Ordinate liegen, da sich hier die Abweichung eines getroffenen Drahtes von der rekonstruierten Spur in Lagenrichtung direkt als Differenz aus dem Funktionswert der rekonstruierten Spur an der Stelle der Abszisse des getroffenen Drahtes und seiner Ordinate ergibt. Die mittleren Koordinaten des Drahtes in der Ebene senkrecht zur Drahrichtung (dies sind im Barrel x und y , in den Endkappen y und z) werden daher durch eine aktive Koordinatentransformation in dieses System transformiert. Wie bereits im vorigen Kapitel argumentiert, ist es durchaus legitim, als Spur des *Sondenmyons* eine Gerade $y(x)$ durch die NHIT Stützstellen zu rekonstruieren, nicht jedoch um jeden Preis, sondern mit einem Schnitt auf die Qualität der Rekonstruktion, für die als Maß die Größe

$$\chi^2 = \frac{\sum_{i=1}^{NHIT} (y - y_i)^2}{NHIT - 2} \quad (6.2)$$

gewählt wurde, die in der Geraden-Fit-Routine LFIT der CERN-Programm-Bibliothek [25] mitgeliefert wird. Die quantitative Wahl dieses Schnitts ist ein Kompromiß zwischen tolerierter Abweichung der getroffenen Drähte von der rekonstruierten Geraden und der Reduktion der Zahl zur Analyse verfügbarer Ereignisse. Abbildung 6.5 zeigt die Verteilung von χ^2 von ca. 140000 gefitteten Spurgeraden aus den Cosmic-Runs 36057/58.

Vor allem um die Statistik nicht zu stark zu schmälern, wurde das maximal tolerierte χ^2 zu $\chi_{max}^2 = 2.0 \text{ cm}^2$ gewählt.

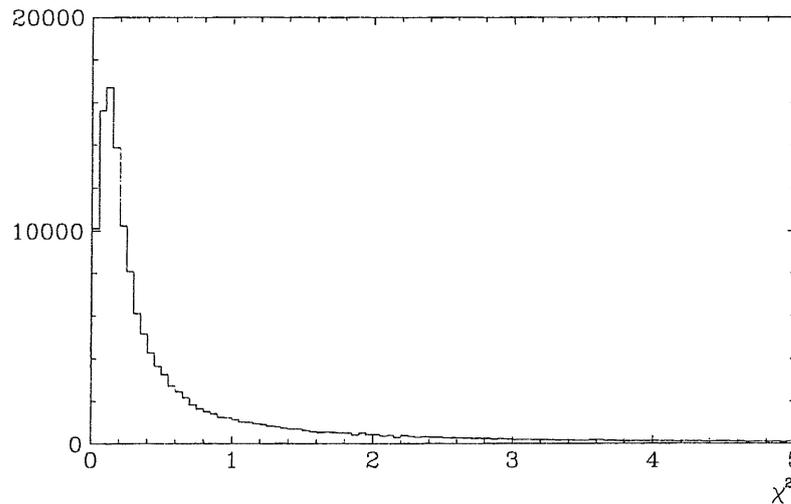


Abbildung 6.5: χ^2 -Verteilung des Geradenfits für 81044 Ereignisse aus Run 36057/58

Mit Hilfe der Spurgleichung wird dann für die Lagen zwischen der innersten und der äußersten getroffenen Lage des Oktanten entschieden, ob die getroffenen Drähte als Konsequenz des Myons mit dieser Spur in Frage kommen, indem der Betrag der Distanz des Drahtes von der rekonstruierten Geraden mit einer Toleranzgrenze XATOL verglichen wird.

Lagen in denen *kein* Draht getroffen gemeldet wurde, werden im Anschluß daraufhin

überprüft, ob im Schnittbereich mit der rekonstruierten Spur überhaupt in einem Abstand kleiner gleich $d_{Korr.}$ in Lagenrichtung ein Streamerrohr (ein Draht) existiert, in dem ein Streamer hätte gesetzt werden können. Sollte letzteres nicht der Fall gewesen sein, wird dies berücksichtigt, indem das Ereignis zur Bestimmung der Nachweiswahrscheinlichkeit dieser Lage nicht herangezogen wird.

Da die Parameter XATOL und $d_{Korr.}$ einen nicht unwesentlichen Einfluß auf das Ergebnis der Bestimmung der Nachweiswahrscheinlichkeit der Streamerrohrlagen haben, wurde auf die quantitative Bestimmung ihrer Optimalwerte besonderen Wert gelegt.

Da man vermeiden will, daß Treffer nicht berücksichtigt werden, nur weil sie gerade außerhalb des XATOL breiten Toleranzstreifens um die rekonstruierte Gerade liegen, orientiert sich die Wahl der Größe von XATOL im wesentlichen an der Verteilung der Residuen Δy der getroffenen Drähte von der Spur. Eine Verteilung letzterer zeigt Abbildung 6.6 für Run 36057/58 vom November 1992.

Zu diesem Zeitpunkt existierte bereits eine Korrektur der lokalen Geometrie der Drähte, nachdem u.a. als Grund für die schlechte Nachweiswahrscheinlichkeit einiger Lagen nur eine falsch dokumentierte Geometrie in Frage kam. Die dazu geführten Untersuchungen werden im nächsten Kapitel vorgestellt.

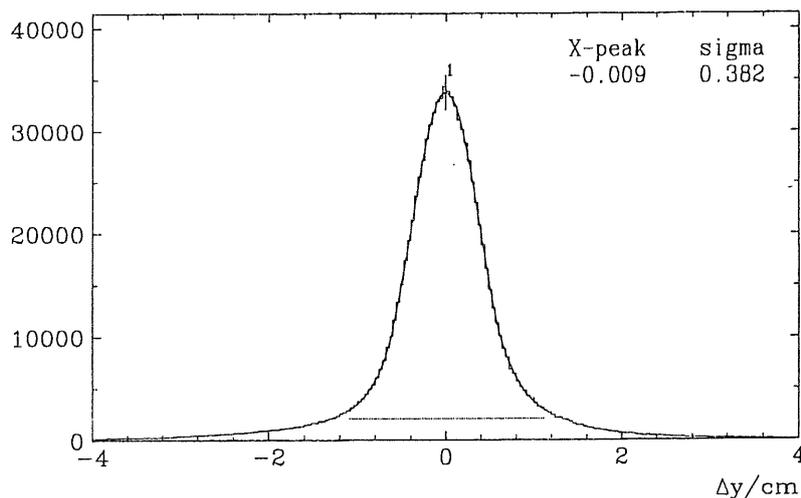


Abbildung 6.6: Verteilung der Residuen $\Delta y' := \Delta y \cos \varphi$ der getroffenen Drähte von der Spur (Run 36057/58, 81044 Ereignisse, $B = 1.14 T$)

So wurde XATOL zu 2.0 cm gewählt, da bei unterlassener Korrektur auf nichtinstrumentierte Bereiche (entsprechend $d_{Korr.} = 0$) bei diesem Wert die bestimmte Nachweiswahrscheinlichkeit ein Plateau erreicht (Abbildung 6.7).

Jeder Draht einer nicht getroffen gemeldeten aber passierten Lage hat einen bestimmten Abstand in Lagenrichtung zur rekonstruierten Spur. Unterschreitet der Betrag des Abstandes mindestens eines Drahtes den Wert der Toleranz $d_{Korr.}$, so erhält die zugehörige Zelle und damit die Lage das Prädikat „ineffizient“. Der optimale Wert für die Toleranz

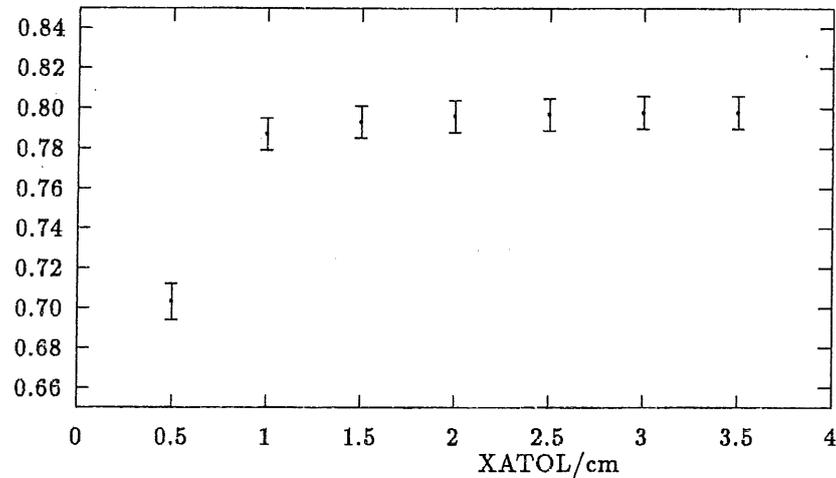
$\epsilon_{NT}(\text{Mod.21})$ 

Abbildung 6.7: Abhängigkeit der gemittelten gemessenen Nachweiswahrscheinlichkeiten der Nichttriggerlagen 6, 7, 9, 10, 11 des Moduls 21 von XATOL, bei ca. 450 Ereignissen pro Lage pro Meßpunkt aus Run 36057 vom November 1992

$d_{Korr.}$ ergibt sich prinzipiell aus Abbildung 6.8 und ist abhängig vom Winkel φ unter dem die Drahtlage vom Myon passiert wird:

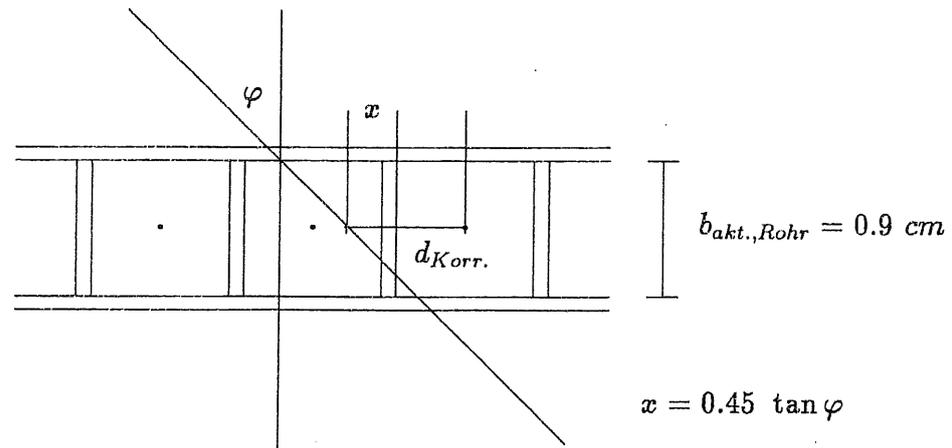


Abbildung 6.8: Geometrische Überlegungen zur Bestimmung von XCTOL

Bei $\varphi = 0$ sollte $d_{Korr.}$ genau gleich einer halben aktiven Rohrbreite sein, also

$$d(\varphi=0) \stackrel{!}{=} 0.45 \text{ cm} \quad (6.3)$$

Für Winkel $\varphi \neq 0$ kann das Rohr aber weiter als 0.45 cm von der Spur entfernt und trotzdem passiert worden sein. Der Abstand des Drahtes von der Spur ist dann im Extremfall, daß die Spur die Kammer gerade tangiert, gegeben durch Gleichung 6.4.

$$d(\varphi) = 0.45 \text{ cm} \cdot (1 + \tan \varphi) = d(\varphi=0) + 0.45 \text{ cm} \cdot \tan \varphi \quad (6.4)$$

Die Distanz des nicht getroffen gemeldeten Drahtes zur Spur wird daher mit der Größe $d_{Korr.}$ verglichen, die durch Veränderung von $XCTOL:=d(0)$ in der Steuerkarte IWLS (Kapitel 8) dann noch variiert werden kann. Der Standardwert von $XCTOL$ wurde bei der Analyse auf den theoretischen Wert $d(\varphi=0) = 0.45 \text{ cm}$ gesetzt.

Mithilfe des Winkels φ , unter dem das Myon die Lage kreuzte, läßt sich über Gleichung 5.3 die Zahl der im Mittel unter diesem Winkel passierten aktiven Volumina errechnen und für jede Lage über alle zur Analyse beitragenden Spuren summieren. So läßt sich der Mittelwert der im Mittel passierten Zahl $\bar{n}(\varphi)$ aktiver Volumina bestimmen, mit dessen Hilfe man dann über Gleichung 5.8 eine Aussage über die Streamerwahrscheinlichkeit machen kann, deren Genauigkeit stark von dem Fehler von $\bar{n}(\varphi)$ also der Breite der Verteilung des Einfallswinkels in den jeweiligen Oktanten abhängt.

Kapitel 7

Ergebnisse der Untersuchungen

7.1 Programmtest mit simulierten Daten

Die Funktionstüchtigkeit des Programms und die Richtigkeit der für die gemachten Annahmen hergeleiteten Beziehung 5.8 zwischen den Nachweiswahrscheinlichkeiten ϵ_{stream} und ϵ_{lay} wurde zunächst mit speziellen, mit dem H1-Simulationsprogramm H1SIM im Detektor simulierten Ereignissen überprüft.

Hierzu wurden statt Myonen, die wie bereits in Kapitel 5 erwähnt, durch aus Wechselwirkungen stammenden Elektronen zur Erhöhung der Drahtmultiplizitäten in den Lagen beitragen, spezielle Sondenteilchen, sog. *Geantinos* generiert, deren einzige Aufgabe es ist, sich entsprechend der für die Simulation eingestellten Nachweiswahrscheinlichkeit eines Detektorteils sich in diesem bemerkbar zu machen. Auf andere Weise wechselwirken diese rein imaginären Teilchen nicht. So wurden jeweils 1000 Geantinos einer Energie von 20 GeV unter den Winkeln $\varphi \in \{0^\circ, 8.9^\circ, 15^\circ, 30^\circ, 45^\circ\}$ direkt von innen nach außen in das als Testmodul gewählte Modul 33 geschossen. Der Vertex befand sich dabei im Abstand 1 cm von Lage 0 und variierte auf der vollen Breite $b_{tot.,El.} = 16.6$ cm eines Elementes. Zur Simulation dieser Geantinos im H1-Detektor wurde für die Streamerrohrkammern (in der Steuerkarte IDSP) eine Streamerwahrscheinlichkeit von $\epsilon_{stream} = 0.80$ eingestellt. Die anschließende Analyse der Ereignisse mit dem Programm IWILEF erfolgte mit folgenden Steuer-Parametern:

geometrische Nachweiswahrscheinlichkeit	: $\epsilon_{geom.} = 0.864$
Maximal toleriertes Δy	: XATOL=2.0 cm
Dummie-Korrektur-Abstand	: XCTOL=0.5 cm
Maximal toleriertes χ^2	: SIGMAX= 2.0 cm
Korrekturen	: INOIS= 0
	: IDEAD= 0
	: ICORR= 1

Abbildung 7.1 zeigt die nach (Gleichung 5.8)

$$\bar{\epsilon}_{Streamer,Lage} = 1 - \left[1 - \frac{\epsilon_{lay}}{\epsilon_{geom}(\varphi)} \right]^{\frac{1}{n(\varphi)}}$$

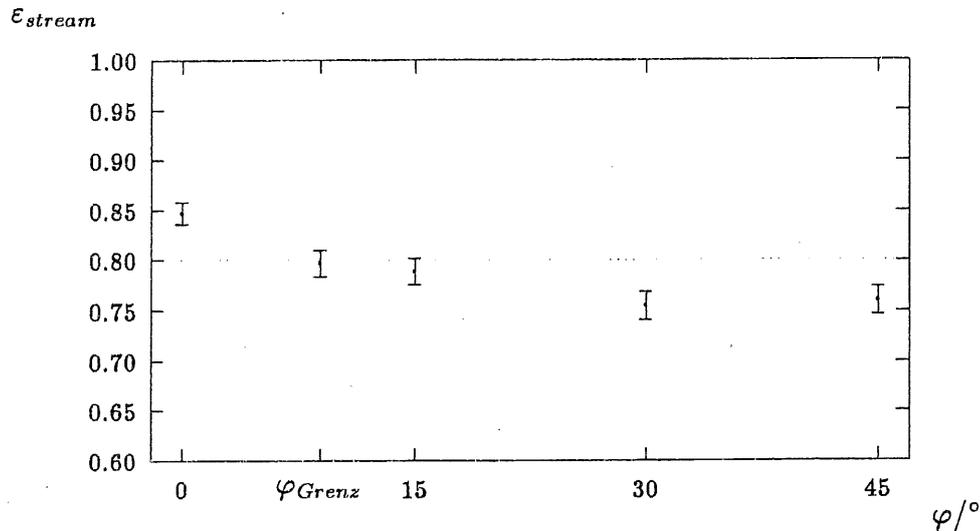


Abbildung 7.1: Rekonstruierte Streamerwahrscheinlichkeit aus bei $\epsilon_{stream} = 0.80$ simulierten Daten von auf einer Elementbreite $b_{tot.,El}$ variiertem Vertex, unter verschiedenen Winkel eingeschossenen 20-GeV-Geantinos.

rekonstruierte Streamerwahrscheinlichkeiten in jeder Lage. Obwohl diese um den Sollwert von $\epsilon_{stream} = 0.80$ um bis zu 4% schwanken, sind diese Abweichungen doch nicht systematisch. Im Rahmen der gemachten Annahme, das Setzen eines Streamers sei unabhängig von der durch das Myon im Rohr zurückgelegten Strecke erscheint daher die für die Simulation im Detektor eingestellte Streamerwahrscheinlichkeit gut reproduziert. Dies bedeutet, daß das Programm IWILEF für die Nachweiswahrscheinlichkeiten vernünftige Ergebnisse liefert und die Überlegungen zum Zusammenhang zwischen ϵ_{lay} und ϵ_{stream} der Realität mehr als nur qualitativ nahe kommen.

7.2 Erste Bestimmung der mittleren Nachweiswahrscheinlichkeit der Lagen aller Module

Eine erste Bestimmung der Nachweiswahrscheinlichkeit der Streamerrohrlagen des H1-Detektors mit oben beschriebenem Programmpaket ergab vor allem im Barrel z.T. starke Differenzen nicht nur der mittleren Lagennachweiswahrscheinlichkeiten von Modulen innerhalb eines Subdetektors, sondern auch der Nachweiswahrscheinlichkeiten der Lagen innerhalb eines Moduls. Abbildung 7.2 zeigt die gemittelte Nachweiswahrscheinlichkeit der Nichttriggerlagen und die dazu beitragenden Einzelwerte für die Barrelmodule. Die zum Mittelwert der Nachweiswahrscheinlichkeit beitragenden Einzelwerte streuen zum Teil beträchtlich um diesen, d.h. innerhalb ein und desselben Moduls (bei nominell identischen Kammerbedingungen in allen Lagen) sind die Nachweiswahrscheinlichkeiten der Einzellagen sehr unterschiedlich.

Für letzteres Phänomen gibt es folgende mögliche Gründe:

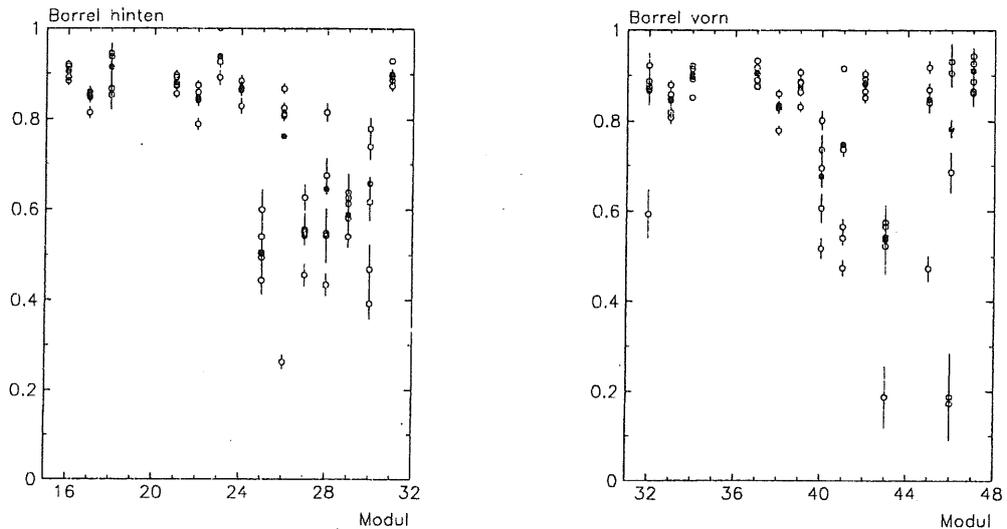


Abbildung 7.2: Gemittelte Lagen-Nachweiswahrscheinlichkeit $\overline{\epsilon_{lay}}$ der Nichttriggerlagen der Barrelmodule (●) und dazu beitragende Einzelwerte (○) mit statistischem Fehler (35325 Ereignisse aus Run 17204, $B = 0.0 T$)

- die Differenzen sind echt, d.h. Gasqualität und Hochspannung innerhalb eines Moduls sind nicht homogen. Dies ist für die Hochspannung praktisch ausgeschlossen, für die Gaszusammensetzung sehr unwahrscheinlich !
- Aufgrund relativ zu großer Laufzeiten erreichen die Signale getroffener Lagen (oder ganzer Module) zu spät die Ausleseeinheiten um getroffen erkannt zu werden.
- Die Differenzen sind methodenbedingt:
 - die Drähte, die getroffen gemeldet wurden, sind bei Vergleich des Residuums Δy mit XATOL zu oft zu weit von der rekonstruierten Spur entfernt, um als Folge des Myons, dessen Spur rekonstruiert wurde, akzeptiert zu werden.
 - Bei Korrektur auf Dummies wird öfter als erwartet entschieden, daß das Myon die nicht getroffen gemeldete Lage sehr wohl in ihrem aktiven Bereich passierte.

Beide Effekte können ihre Ursache darin haben, daß die in der H1-Datenbasis gespeicherten Positionen der Drähte nicht mit der Realität übereinstimmen.

Es sollte sich zwar zeigen, daß die Geometrie der Myonkammern sich nicht so darstellt, wie die Datenbasis angab (s.u.), dies aber aufgrund der Toleranzen des Algorithmus nur vereinzelt zu Verbesserungen der Nachweiswahrscheinlichkeit von maximal 1% führte. Darum wird an dieser Stelle auf die Angabe der Nachweiswahrscheinlichkeiten *nach* der Korrektur verzichtet.

Die Gründe für die gerade in der Barrelbasis niedrige Nachweiswahrscheinlichkeit lagen vielmehr in der zu dem damaligen Zeitpunkt (Beginn der ersten Runperiode) noch fehlerhaften Verkabelung der Kammern. Dies bezieht sich vor allem auf die Kabellängen, wie schon im zweiten Punkt vermutet.

7.3 Korrektur der lokalen Geometrie

Da die Drähte in den Schlitz zwischen den Eisenplatten quasi nur einen Freiheitsgrad senkrecht zum Draht besitzen, wird zur Bestimmung der relativen Deplazierungen der Lagen die Verteilung der Residuen Δy der getroffenen Drähte von der rekonstruierten Spur für jede Lage einzeln aufgenommen. Hierzu wurde der Rumpf des Programmpakets bestehend aus Spurerkennung, -rekonstruktion und Residuenbestimmung verwendet ohne simultan die Nachweiswahrscheinlichkeiten zur bestimmen, um durch Reduktion der benötigten Rechenzeit pro Ereignis die Statistik zu maximieren. Bei Übereinstimmung der realen und der in der H1-Datenbasis festgehaltenen Geometrie erwartet man Gaußverteilungen um den Wert $\Delta y = 0$ mit einer die Ausdehnung eines Streamerrohres repräsentierenden Breite σ . Bei Inkonsistenzen der beiden Geometrien liegt das Maximum der Residuenverteilungen bei eben dem Wert der mittleren Differenz, bei nur partieller Deplazierung (z.B. nur einige Elemente) ist die Verteilung charakteristisch verbreitert und verformt. Da eine Auflistung dieser Analyse für alle untersuchten Lagen den Rahmen dieser Arbeit sprengen, seien hier nur exemplarisch die Ergebnisse der Untersuchungen für die Eisenlagen im Modul 37 gegeben (Abbildung 7.3), da in diesem Modul alle theoretisch vorkommenden Fälle auch wirklich auftreten. Die Lagen 4, 5, 6, 8, 9, 11 sind alle global um bis zu 0.37 cm, also fast einer halben Streamerrohrbreite gegenüber der in der Datenbasis festgehaltenen Position verschoben. In der Residuenverteilung der Lage 7 sieht man eine schon oben angedeutete Besonderheit: die Lage ist nur partiell dispositioniert. Bei Aufnahme der Residuenverteilungen für jedes einzelne *Element* dieser Lage ergab sich als Ursache für das deutliche Nebenmaximum in der Verteilung für Lage 7 eine Verschiebung der beiden Elemente auf der einen Seite des Dummies (siehe Abbildung 4.5) um fast 1.5 cm.

Nach Auswertung dieser Residuenverteilungen wurde die BOS-Bank IGLC (Iron Geometry Local Correction) ¹ aktualisiert, in der für jede Lage jeden Moduls die Differenz zwischen Soll- und Istposition eines bestimmten Kanalnummernbereiches in der untersuchten Dimension angegeben wird. Diese Korrektur ist eine lokale, relativ zwischen den Lagen eines Oktanten, eine Überprüfung der globalen Übereinstimmung der Geometriedaten der Myonkammern in der Datenbasis mit der Realität steht aber noch aus.

7.4 Abhängigkeit der Nachweiswahrscheinlichkeit von der Hochspannung

Zur Auffindung der optimalen Spannung bei Betrieb der H1-Streamerrohrkammern mit dem dreikomponentigen Gas wurde neben den bereits oben erwähnten Untersuchungen der Druckabhängigkeit der Streamerladung auch eine Hochspannungskurve aufgenommen. Gewöhnlich erwartet man bei Detektoren dieses Funktionsprinzips, daß die Rate mit steigender Betriebsspannung in ein Plateau läuft, da dann quasi auch niederenergetischere Myonen ausreichend große Streamer produzieren. Da die Nachweiswahrscheinlichkeit der Lagen aufgrund des vorliegenden Triggers aber ursächlich ist für die gemessene Rate, ist eine Untersuchung der Abhängigkeit der Nachweiswahrscheinlichkeit der Lagen von der

¹auf der DESY-IBM unter CMZ in HERA01.H1TEXT.IRTX.IGLC

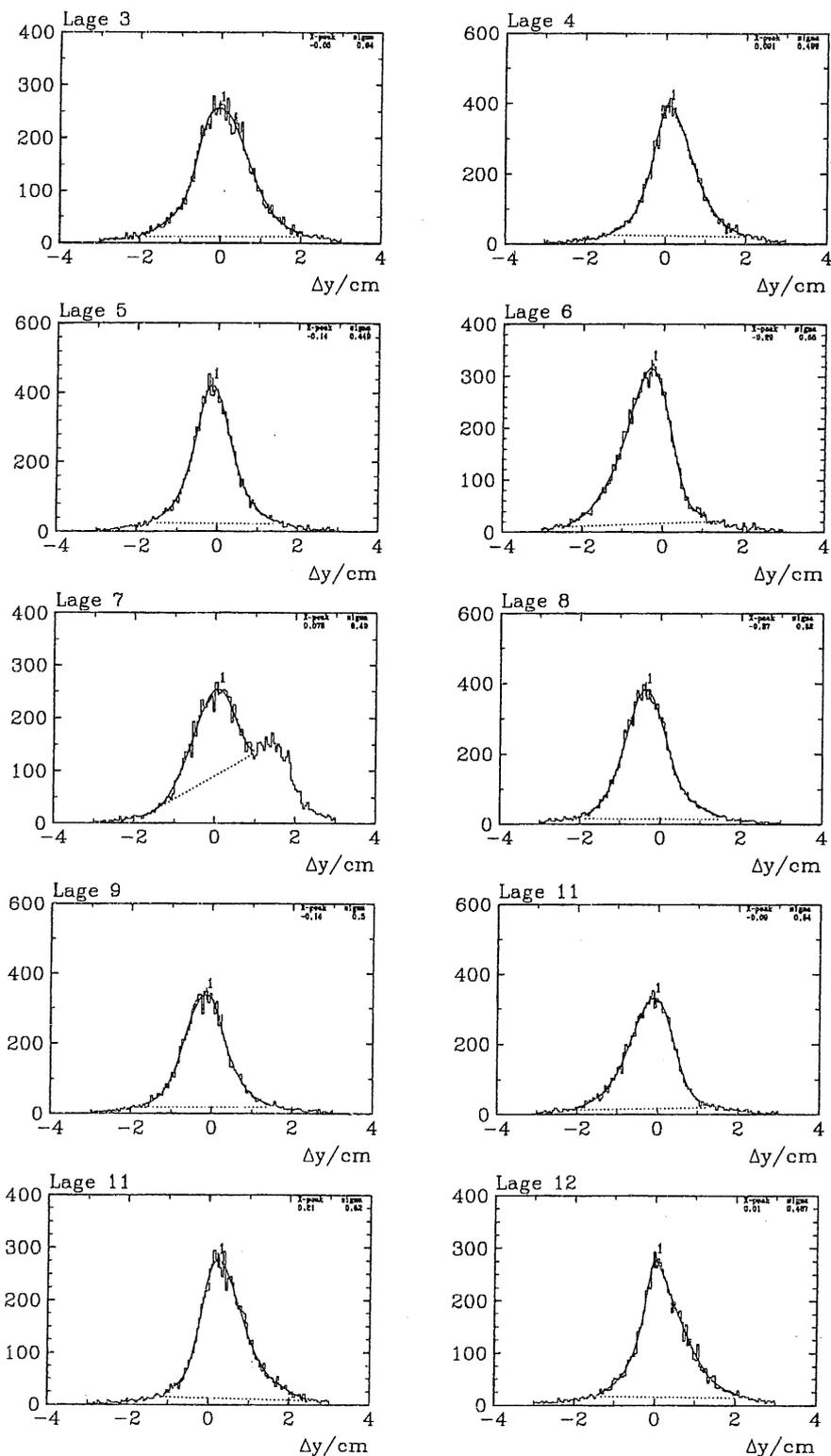


Abbildung 7.3: Residuenverteilungen der Lagen 3-12 im Modul 37 bei 76970 Ereignissen aus Run 17204 ($B = 0.0 T$)

Hochspannung ebenso sinnvoll und sollte ein ähnliches Verhalten zeigen. Die Daten aus den Cosmic-Runs 13759ff., bei denen die Betriebsspannung zwischen 4350 und 4550 V in 50V-Schritten variiert (und jeweils um $\Delta HV(p)$ korrigiert) wurde, ergaben für die damals noch nicht korrigierte Geometrie verständlicherweise keine sinnvoll mittelbaren Ergebnisse für ganze Subdetektoren, sondern nur für einzelne Module. Zudem waren die bestimmten Nachweiswahrscheinlichkeiten der Lagen einzelner Module aufgrund von Problemen mit Signallaufzeiten durch falsche Kabellängen wenig aussagekräftig. Die gemittelte Nachweiswahrscheinlichkeit der Nichttriggerlagen der Module 3, 21, 37 und 51, also aus jedem Subdetektor ein Repräsentant, zeigt Abbildung 7.4. Man erkennt zwar deutlich den erwar-

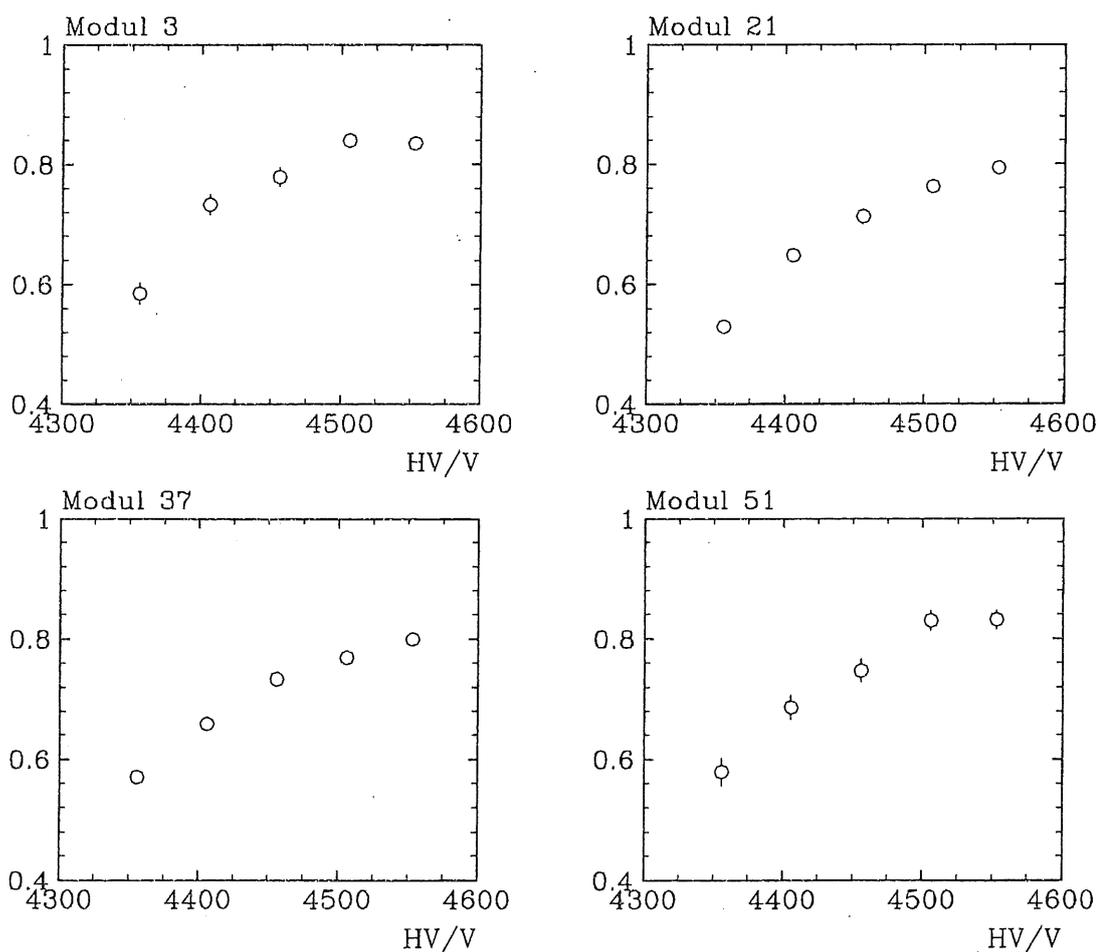


Abbildung 7.4: Abhängigkeit der mittleren Nachweiswahrscheinlichkeit $\overline{\varepsilon_{lay}}$ der Nichttriggerlagen verschiedener Module von der Hochspannung

teten Anstieg der Nachweiswahrscheinlichkeit mit steigender Hochspannung, ein deutliches Plateau wird jedoch nicht erreicht. Eine Erhöhung der Spannung über 4550 V hinaus war nicht möglich, da bei diesen Spannungen die Ströme in den Drähten die $5\mu A$ -Grenze erreichte und die Hochspannung vom Kontrollsystem abgeschaltet wurde. Auch deswegen wurde als Standardbetriebsspannung 4500 Volt gewählt.

7.5 Rückschlüsse von der Nachweiswahrscheinlichkeit auf Gasqualität und Hochspannung

Betrachtet man die mittleren Nachweiswahrscheinlichkeiten der Nichttriggerlagen der Module in den Endkappen, hier bestimmt aus ca. Ereignissen der Cosmic-Runs 20305ff. vom Mai 1992, so fällt auf, daß sie mit der Modulnummer, also der y -Koordinate ansteigt (Abbildung 7.5). Eine zusätzliche Untersuchung der Padladungen [27] ergab, daß die La-

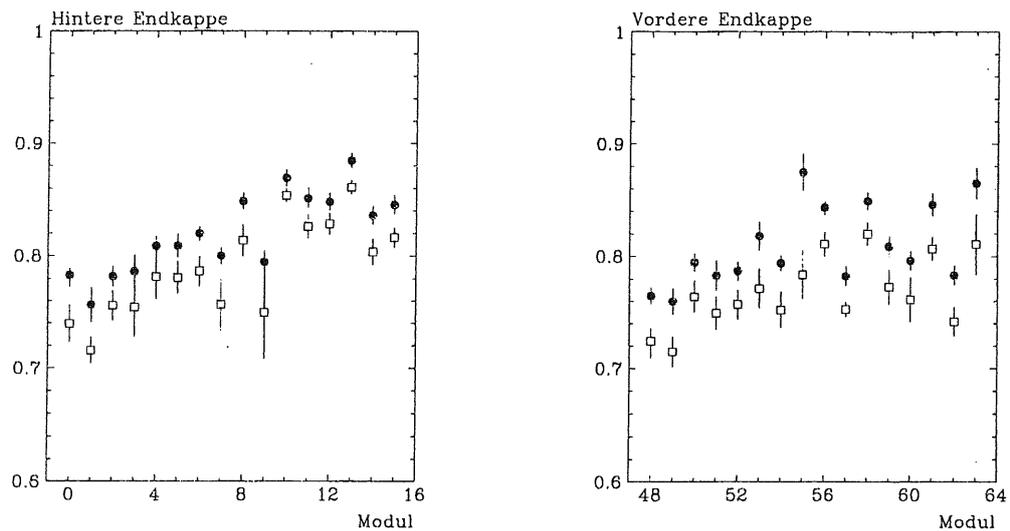


Abbildung 7.5: Gemittelte Lagen-Nachweiswahrscheinlichkeit $\overline{\varepsilon_{lay}}$ der Nichttriggerlagen der Endkappenmodule (●) und daraus rekonstruierte Streamerwahrscheinlichkeit $\overline{\varepsilon_{stream}}$ (□) mit statistischem Fehler (11585 Ereignisse aus Run 20305ff., $B = 1.14 T$)

dungsausbeute oben in den Endkappen größer war als unten. Es scheint, daß die Betriebsparameter der Kammern sich zwischen Modul 0(48) und Modul 15(63) erheblich verändern. Die Hochspannung wird ständig überprüft und ändert sich *nicht* von unten nach oben. De facto werden aber die Kammern in den Endkappen von oben (große y) mit Frischgas versorgt. Weitere Untersuchungen ergaben, daß von oben nach unten der O_2 -Anteil des Gases stark zunimmt und dieser die Streamerwahrscheinlichkeit extrem herabsetzt [28], dieses Faktum wäre eine plausible Erklärung für das beobachtete Verhalten der Kammern, ist jedoch noch nicht eindeutig verifiziert. Das Programmpaket IWILEF eignet sich demnach neben der Offenlegung trivialer Hardwarefehler auch zur Aufdeckung komplizierterer Betriebsprobleme des Myonsystems.

7.6 Abschließende Bestimmung der mittleren Nachweiswahrscheinlichkeit der Lagen aller Module

Im November 1992 wurden kurz nach Ende der ersten Runperiode noch einmal Daten kosmischer Myonen mit dem oben beschriebenen Kalibrationstrigger genommen. Diese Daten wurden mit IWILEF zur Bestimmung der mittleren Nachweiswahrscheinlichkeit der Lagen aller Module analysiert. Dabei wurden bisher unverstandene technische Probleme mit den Lagen der Module in den Endkappen offenbar, so daß es sinnvoll erschien, hier nur die Ergebnisse für die Barrelmodule vorzulegen. Die Abbildungen 7.6 zeigen die gemittelte Nachweiswahrscheinlichkeit $\bar{\epsilon}_{lay}$ der Nichttriggerlagen und die nach Gleichung 5.8 berechnete Streamerwahrscheinlichkeit wiederum gemittelt für alle Nichttriggerlagen mit dem mittleren Fehler des Mittelwerts. Bei Betrachtung der Nachweiswahrscheinlich-

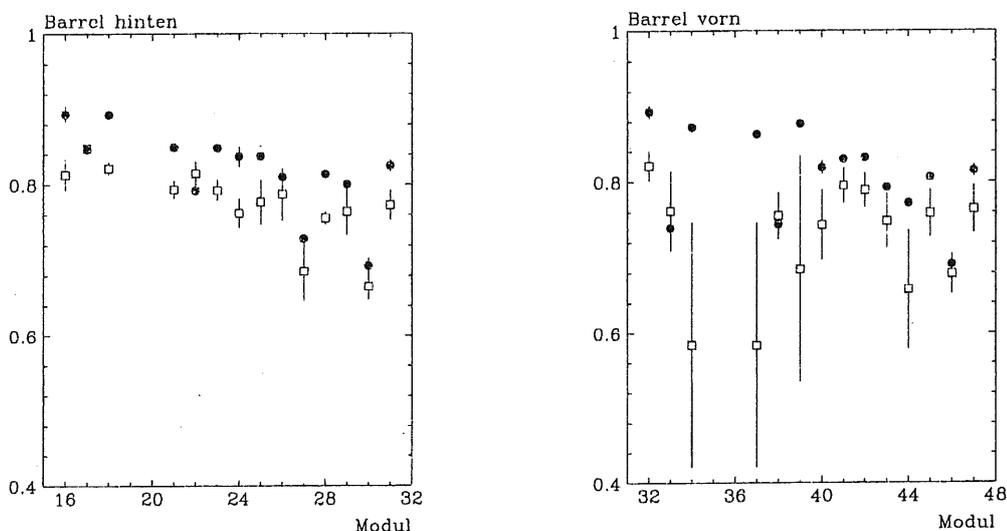


Abbildung 7.6: Gemittelte Lagen-Nachweiswahrscheinlichkeit $\bar{\epsilon}_{lay}$ der Nichttriggerlagen der Barrelmodule (●) und daraus rekonstruierte Streamerwahrscheinlichkeit $\bar{\epsilon}_{stream}$ (□) mit statistischem Fehler (81044 Ereignisse aus Run 36057/58, $B = 1.14 T$)

keiten der Barrelmodule fällt folgendes auf:

- die gemittelte Streamerwahrscheinlichkeit $\bar{\epsilon}_{stream}$ in den Nichttriggerlagen ist in einigen Modulen (17, 22, 33, 38) größer oder gleich der gemittelten Lagen-Nachweiswahrscheinlichkeit $\bar{\epsilon}_{lay}$. Dies rührt daher, daß in diesen Modulen der gemittelte Eintrittswinkel in die Lagen φ kleiner ist als der Winkel $\varphi_{Grenz} = 8.9^\circ$, was bei Betrachtung der für diese Module geltenden Triggerbedingungen und der dadurch bedingten Winkelverteilungen (Abbildung 7.7) auch einsichtig ist.
- in einigen Modulen (34, 37, 39, 44) ist $\bar{\epsilon}_{stream}$ sehr viel kleiner als $\bar{\epsilon}_{lay}$ ($\bar{\epsilon}_{lay} - \bar{\epsilon}_{stream} > 0.10$) und mit einem Fehler $\Delta\bar{\epsilon}_{stream} \geq 0.08$ behaftet. Der große

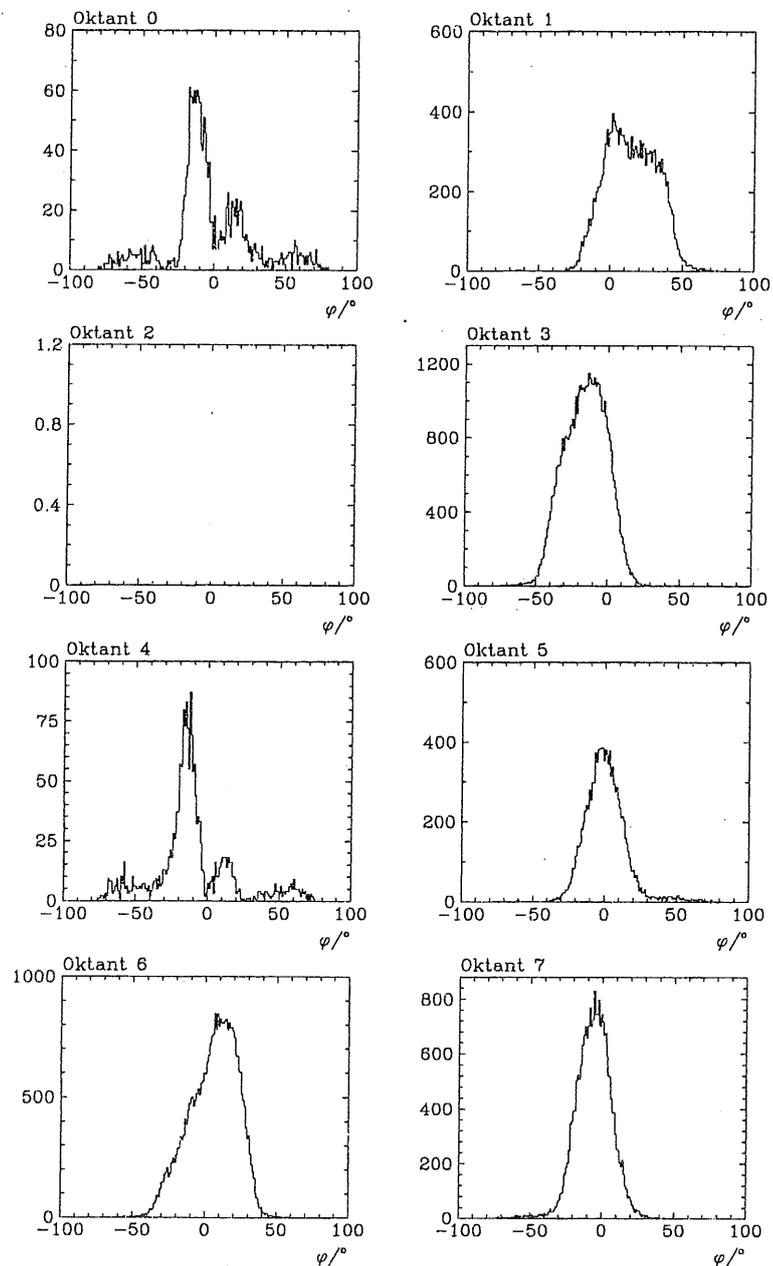


Abbildung 7.7: Verteilung der Eintrittswinkel φ in die Oktanten des Barrels, jeweils für gleichnamige Oktanten des FBA und BBA in einer Abbildung (Run 36057/58, $B = 1.14 T$).

Fehler des Mittelwertes $\overline{\varepsilon_{stream}}$ resultiert aus den aus sehr verschiedenen Lagen-Nachweiswahrscheinlichkeiten rekonstruierten Streamerwahrscheinlichkeiten. Hierzu tragen hauptsächlich die berücksichtigten Nachweiswahrscheinlichkeiten der Lagen der Myonboxen (Lage 0-2 und/oder 13-15) bei. Der zu $\overline{\varepsilon_{lay}}$ relativ kleine Wert von $\overline{\varepsilon_{stream}}$ kann ebenfalls hierin seine Ursache haben, zum anderen aber auch darin, daß der mittlere Eintrittswinkel der Myonen relativ groß ist, dies ist jedoch nicht der Fall, wie ebenfalls aus den Winkelverteilungen hervorgeht.

- Die Winkelverteilungen der Spuren in den Oktanten 1, 3, 5, 6 und 7 werden direkt aus den Triggerbedingungen und Winkelangaben aus Tabelle 5.1 unter Zuhilfenahme von Abbildung 4.3 plausibel. Dies sei am Beispiel der Winkelverteilung des Oktanten 3 erklärt: Die Modultrigger des Oktanten 3 können zwei verschiedene Triggerbedingungen erfüllen. Für die Triggerbedingung „Modultrigger in Oktant 3 und 7“ (Bit 1 bzw. 5) erwartet man eine um $\varphi = 0$ symmetrische Verteilung mit Winkeln $|\varphi| \leq 22.5^\circ$. Hierzu addiert sich jedoch die Verteilung der Spuren, bei denen die Triggerbedingung „Modultrigger in Modul 5 ($N_{Modul,Subdet.}$, siehe 4.2.2) und Oktant 6“ (Bit 3 bzw. 7), für die aufgrund der Geometrie Spürwinkel $|\varphi| \leq 45^\circ$ erwartet werden. Wegen der Wahl des Koordinatensystems (Drehung des H1-Systems um seine z -Achse, bis die x -Achse Lot auf die Lagen des Oktanten ist) sind die Spürwinkel φ in Oktant 3 nun bevorzugt negativ, so daß Erwartung und Realität (in Abbildung 7.7) nur wenig voneinander abweichen. Die Herleitung der Verteilungen für die anderen Oktanten sei nun dem Leser selbst überlassen.
- In den Winkelverteilungen der Spuren durch Oktant 0 (Module 16, 31, 32, 47) und Oktant 4 (Module 23, 24, 39, 40) spiegelt sich am deutlichsten die Zenitwinkelabhängigkeit der Myonintensität I_μ wieder. Diese wird, wenn ϑ der Zenitwinkel ist, beschrieben durch

$$I_\mu(\vartheta) \propto c(\vartheta) \cos^2 \vartheta$$

und erklärt sowohl die geringe Statistik als auch das Minimum bei $\varphi = 0^\circ$. Die beiden Peaks bei $\varphi \approx -15^\circ$ und $\varphi \approx +15^\circ$ haben ihre Ursache in der Forderung von einem Myon in Oktant 0 *und* einem Myon in Oktant 4 durch den Trigger. Die Ausläufer der Verteilungen reichen durch Koinzidenzen aus kosmischen Myonschauern wie in Abbildung 7.8 bis $\varphi \approx \pm 80^\circ$. Die Asymmetrie dieser Verteilungen, sowie die Tatsache, daß wider Erwarten die Raten in den Oktanten 0, 1 und 7 innerhalb des HERA-Ringes z.T. weniger als halb so groß sind wie die in den Oktanten 3, 4 und 5 außerhalb des Ringes scheint für einen größeren Myonfluß aus Richtungen außerhalb des Ringes zu sprechen. Die Ursache hierfür ist noch unklar. Eine unterschiedliche äußere Abschirmung kommt nach Untersuchung der primären Information der IRTE-Bank über die Energie der gesehenen Myonen nicht in Frage. Für die Barrelsektanten 2 ist Abbildung 7.7 leer, da hier die Eisenlagen noch nicht installiert sind (siehe auch Abbildung 4.8) und die Segmente in den Myonboxen bei der Spurerkennung a priori die Qualität $Q = 0$ erhalten, es also im Schritt der Spurrekonstruktion keine Spürkandidaten für diese Oktanten gibt.

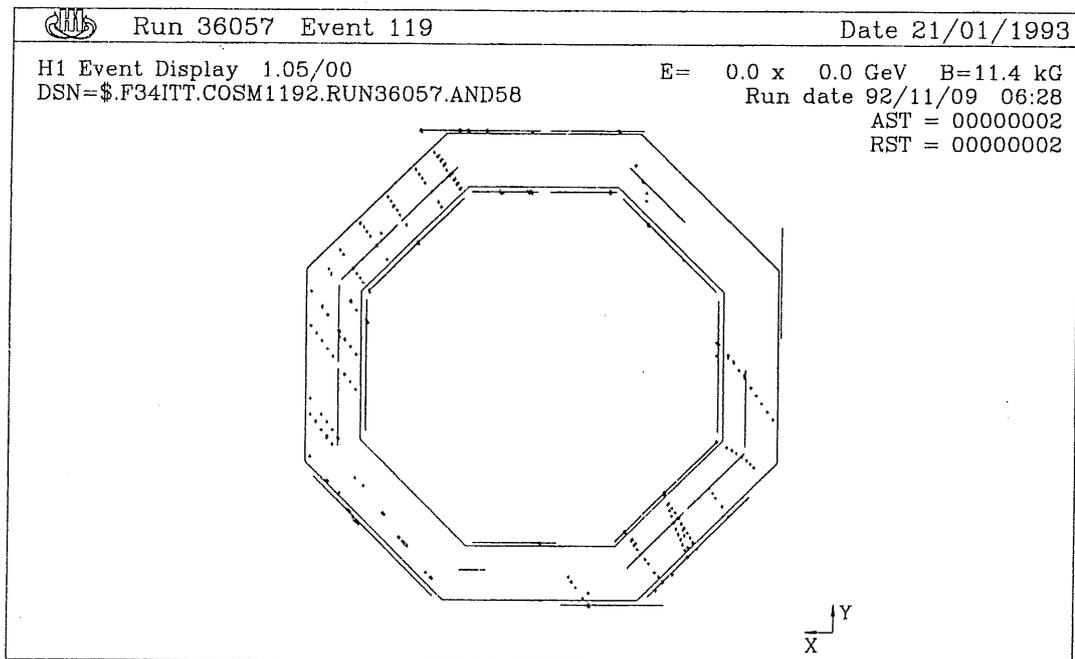


Abbildung 7.8: Ereignis eines kosmischen Myonschauers mit mehreren sauberen Spuren im Barrel

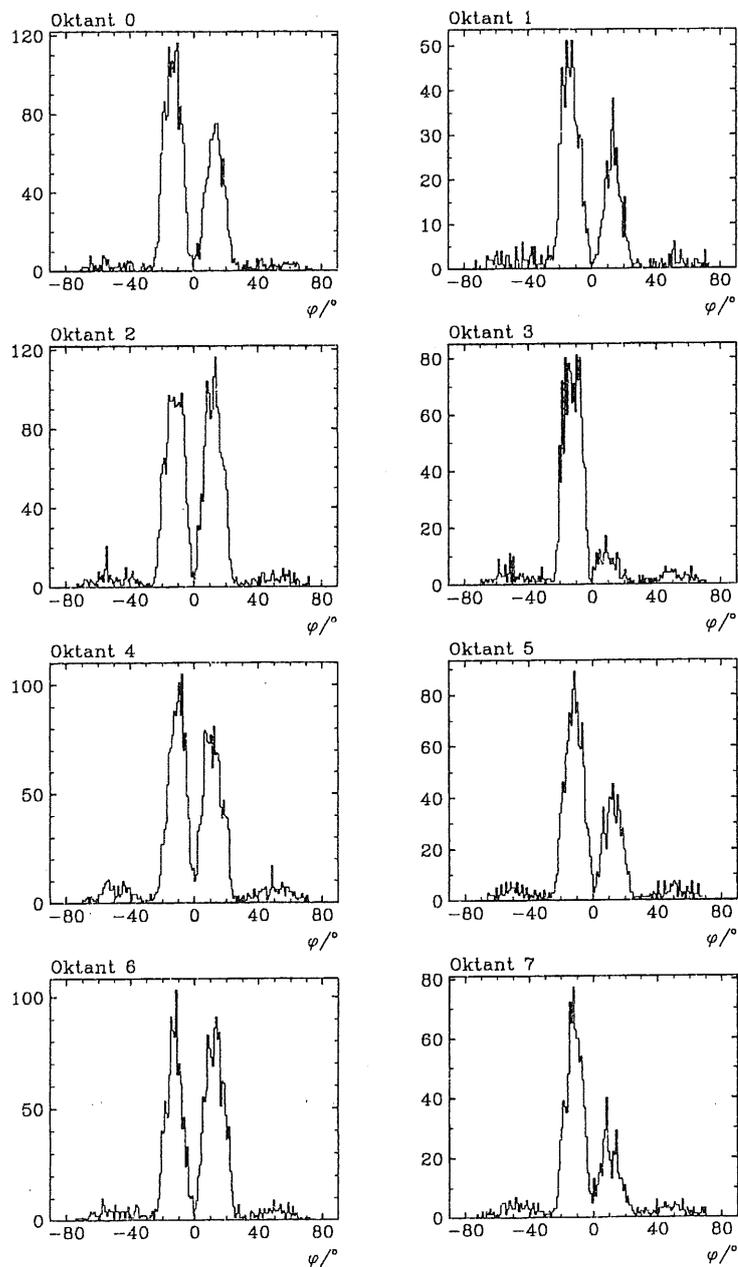


Abbildung 7.9: Verteilung der Eintrittswinkel φ in die Oktanten der Endkappen jeweils für gleichnamige Oktanten des FEC und BEC in einer Abbildung (Run 20305ff., $B = 1.14 T$).

Zur Beschreibung des Zustandes des Myonsystems in den Endkappen betrachte man aufgrund der obengenannten technischen Probleme in der vorderen Endkappe bei der Datennahme im November 1992 noch einmal die gemittelten Nachweiswahrscheinlichkeiten der Nichttriggerlagen, bestimmt aus den Daten der Runs 20305ff. in Abbildung 7.5. Bei den Nachweiswahrscheinlichkeiten der Lagen in den Endkappen beobachtet man abgesehen von deren bereits behandeltem Anstieg mit der Modulnummer (Höhe in y) stets Differenzen $\overline{\epsilon_{lay}} - \overline{\epsilon_{stream}} \leq 0.05$, was die zugehörigen Verteilungen der Eintrittswinkel in die Lagen (Abbildung 7.9) mit Maxima bei $\vartheta \approx \pm 15^\circ$ auch plausibel machen.

Die Ähnlichkeit der Verteilungen des Winkels φ der Spuren in den Endkappen mit denen der Oktanten 2 und 4 im Barrel ist kaum verwunderlich, wenn man sich vor Augen führt, daß die Lagen in beiden Fällen parallel zur y -Achse, die Drähte in Ebenen parallel zur xz -Ebene verlaufen. Durch die Triggerbedingung, daß aus *beiden* Endkappen ein Modultrigger-Signal vorliegen muß und die Geometrie sind die Winkel der Spuren auf Werte φ kleiner ca. 25° beschränkt. Größere Spurwinkel rühren wiederum von Myonschauern (s.o.).

7.7 Zusammenfassung

Mit dem Programmpaket IWILEF ist es möglich die Nachweiswahrscheinlichkeit ϵ_{lay} der Lagen des Myonsystems des H1-Detektors zu bestimmen. Diese beträgt nach den zuletzt ausgewerteten Daten für die Nichttriggerlagen ca. 82%, womit bei der aktuellen Modultriggerbedingung, daß drei der fünf Triggerlagen das Myon gesehen haben müssen je nach Zahl der passierten Triggerlagen folgende Modultriggerwahrscheinlichkeiten resultieren:

Passierte Triggerlagen	3	4	5
Modultriggerwahrscheinlichkeit	0.551	0.849	0.956

Damit erscheint die Zuversicht, bestimmte seltene Prozesse mit Myonen im Endzustand zu finden nicht unbegründet.

Gleichzeitig läßt sich eine, wenn auch vorsichtige Aussage über die Streamerwahrscheinlichkeit ϵ_{stream} treffen, die im Mittel bei ca. 75 % lag. Über diese beiden Größen lassen sich technische Unzulänglichkeiten wie schlechte Gasqualität, defekte Hochspannungsvorsorgung etc. diagnostizieren, die bei Benutzung während der Datennahme ein direktes Handeln ermöglichen.

Die in der Datenbasis festgehaltene Geometrie des Myonsystem wurde durch die Korrektur-Bank IGLC mit der Realität in Einklang gebracht, was die volle Rekonstruktion von Ereignissen im Myonsystem präzisiert.

Kapitel 8

Benutzung des Programmes IWILEF

Die zur Bestimmung der Nachweiswahrscheinlichkeit der H1-Myonkammern nötige Software befindet sich auf der DESY-IBM auf dem Bereich F34ITT in dem Quell-Datensatz F34ITT.IWILEF.S .

Alle Routinen wurden bestmöglich kommentiert, so daß ein Lesen des Quellcodes und den zugehörigen Kommentaren zum Verständnis des Algorithmus ausreichen sollte. Dennoch sollen die wichtigsten Punkte an dieser Stelle kurz erklärt werden.

Die Routine IWILEF kann entweder in jeden beliebigen H1REC-Job im H1REC-Main-Programm zusammen mit oder statt ITREC aufgerufen werden, oder als selbstständiges Programm mit dem Job #EFF gestartet werden. Bei ersterer Möglichkeit muß zuvor noch die Steuerkarte IWLS implementiert werden, die der Job #EFF schon enthält. Diese enthält alle in Kapitel 6 eingeführten Variablen:

```
*
IWLS 1 /           !   IWILEF- und FDTRCK-Steuerparameter
*   *****
*   *   H. Itterbeck 16/12/92 *
*   *****
2           ! LHEAD           Headerlänge
12          ! NIWLS           Zahl der Steuerparameter
921216     ! YYMMDD          Datum der Version
*
1           ! IPRNT           Ausgabe der Steuerparameter   (ja=1)   1
*
*           FDTRCK-Parameter
*   -----
30.         ! DXYCUT (cm)     Maximal tolerierter Abstand 2er Dr"achte   2
40.         ! DSECUT (cm)     Maximal tolerierter Abstand 2er Segmente   3
*
*           IWILEF-Parameter
*   -----
1           ! ICORR           Korrektur auf Dummies   an/aus(1/0)   4
```

```

1      ! IDEAD      Korrektur auf tote Kanäle an/aus(1/0)  5
1      ! INOIS      Korrektur auf noisy Kanäle an/aus(1/0)  6
2.0    ! XATOL (cm)  Maximal tolerierter Abstand Treffer-Spur  7
0.45   ! XCTOL (cm)  Min. Abstand Draht/Spur bei Dummiokorr.  8
2.0    ! SIGMAX      Maximales chi**2/Freiheitsgrad des Fits  9
0.86434574 ! EGEO90   Geometrische Nachweiswahrsch. bei phi=0  10
40.    ! HITMAX      Maximal tolerierte Trefferzahl/Oktant  11
8.9194955 ! GREWI (deg) Winkel bei dem n(phi)=1  12
*** END OF IWLS
%
```

Im Joboutput gibt es zu jeder Lage jeden Moduls folgende Informationen:

Lagennummer, Zahl der Treffer, Zahl der Ereignisse, daraus berechnet die Lagen-Nachweiswahrscheinlichkeit, die Zahl der Ereignisse, bei denen die Passage eines Dummies detektiert wurde, der mittlere Winkel $\bar{\varphi}$, unter dem das Myon die Lage passierte und die daraus berechnete mittlere Streamerwahrscheinlichkeit ϵ_{stream} .

Für jedes Modul wird zusätzlich mit dem DESY-internen Graphikpaket LOOK [30] die Lagen-Nachweiswahrscheinlichkeit gegen die Lagennummer aufgetragen (Abb.-Nr. 1000-1063), ebenso für jeden Subdetektor (BEC, BBA, FBA und FEC) die mittlere Lagen-Nachweiswahrscheinlichkeit ϵ_{lay} der Nichttriggerlagen und die rekonstruierte Streamerwahrscheinlichkeit für jedes Modul über der Modulnummer (Abb.-Nr. 2000-2003). Des weiteren werden alle relevanten Größen histogrammiert:

	Kommentar	Abb.-Nr.
in FDTRCK:	die Abstände zweier getroffener Drähte zueinander,	110
	die Abstände zweier gefundener Segmente,	120
	die Qualität der als Spurkandidat befundenen Segmente,	130
in IWILEF:	die Zahl der getroffen gemeldeten Drähte pro Modul,	210
	die Drahtmultiplizitäten pro Lage	220
	die Nummern der äußersten und innersten getroffenen Lage der untersuchten Segmente,	240+250
	das χ^2 des Spurgeradenfits,	260
	die Winkel φ der gefitteten Spur gegen das Lot auf die Lage, jeweils für gleichnamige Oktanten im Barrel und in den Endkappen gemeinsam aufgetragen	270-280
	die aus dem Winkel φ berechnete Drahtmultiplizität pro Lage	230
	die Residuen der getroffenen Drähte zur rekonstruierten Spur	290

Dies sind die gleichen Informationen, die den in Kapitel 7 gemachten Untersuchungen zugrundeliegen. Dem Benutzer steht es natürlich frei, noch zusätzliche Einzelheiten des Bestimmungsweges der Nachweiswahrscheinlichkeiten auf diesem Wege sichtbar zu machen.

Abbildungsverzeichnis

1.1	Der Speicherring HERA beim DESY	5
2.1	Feynman-Graph der Quark-Antiquark-Produktion durch $\gamma\gamma$ -Fusion	10
2.2	Feynman-Graph der Reaktion $\gamma\gamma \rightarrow \mu\mu$	10
2.3	Feynman-Graph der Produktion angeregter Elektronen	11
2.4	Feynman-Graph der W -Boson-Produktion mit Drei-Boson-Vertex	12
3.1	Das H1-Spurkammersystem	15
3.2	Der H1-Detektor	16
3.3	Das LAr-Kalorimeter von H1	17
3.4	Die ersten 32 Stufe 1 Triggerbits der zentralen H1-Datennahme.	20
4.1	Querschnitt durch ein H1-Streamerrohr-Element	24
4.2	Unterteilung des H1-Streamerrohrsystems in Subdetektoren	26
4.3	Unterteilung der Subdetektoren in Module	26
4.4	Schnitt durch ein Modul des H1-Streamerrohrsystem	27
4.5	Verteilung der Dummies in den Barrelmodulen	28
4.6	Die inneren Myonlagen des H1-Detektors	29
4.7	Die äußeren Myonlagen des H1-Detektors	29
4.8	Status der Instrumentierung des Myonsystems des H1-Detektors 1992 . . .	30
4.9	Die Turmverteilung im H1-Detektor (Längsschnitt)	32
5.1	Reduktion der Bestimmung von ε_{lay} auf zwei Dimensionen	35
5.2	Abhängigkeit der Zahl passierter akt. Volumina n und ε_{geom} von (φ)	37
5.3	Hadronischer Schauer durch ein simuliertes Pion.	41
5.4	Impulsabschätzung der bei der Analyse verwendeten Myonen	41
5.5	Drahtmultiplizitäten pro Lage bei simulierten und realen kosmischen Myonen	42
5.6	Systematischer Fehler der gemessenen Nachweiswahrscheinlichkeiten der Triggerlagen	44
5.7	Beispiel für die Spur eines „Edge Crosser“-Myons	45
5.8	Nachweiswahrscheinlichkeiten ε_{lay} der Lagen von Modul 44	45
6.1	Veranschaulichung der Spurkandidatenfindung	49
6.2	Verteilung der Abstände D_{Draht} der Mitten zweier getroffener Drähte bei 81044 Ereignissen aus Run 36057/58.	50
6.3	Verteilung der Abstände zweier Segmente (Run 36057/58, $B = 1.14 T$) . .	51

6.4	Verteilung der Qualität Q der Spurkandidaten bei 81044 Ereignissen aus Run 36057/58 ($B = 1.14 T$)	52
6.5	χ^2 -Verteilung des Geradenfits für 81044 Ereignisse aus Run 36057/58	53
6.6	Verteilung der Residuen $\Delta y' := \Delta y \cos \varphi$ der getroffenen Drähte von der Spur (Run 36057/58, 81044 Ereignisse, $B = 1.14 T$)	54
6.7	Abhängigkeit der gemessenen Lagen-Nachweiswahrscheinlichkeit von XATOL	55
6.8	Geometrische Überlegungen zur Bestimmung von XCTOL	55
7.1	Rekonstruierte Streamerwahrscheinlichkeit aus bei $\varepsilon_{stream} = 0.80$ simulierten Daten	58
7.2	Gemittelte ε_{lay} der Nichttriggerlagen der Barrelmodule und dazu beitragende Einzelwerte (Run 17204, $B = 0.0 T$)	59
7.3	Residuenverteilungen der Lagen 3–12 im Modul 37 bei 76970 Ereignissen aus Run 17204 ($B = 0.0 T$)	61
7.4	Abhängigkeit der mittleren Nachweiswahrscheinlichkeit $\overline{\varepsilon_{lay}}$ der Nichttriggerlagen verschiedener Module von der Hochspannung	62
7.5	Gemittelte ε_{lay} der Nichttriggerlagen der Endkappenmodule und daraus rekonstruiert ε_{stream} (Run 20305ff., $B = 1.14 T$)	63
7.6	Gemittelte ε_{lay} der Nichttriggerlagen der Barrelmodule und daraus rekonstruiert $\overline{\varepsilon_{stream}}$ (Run 36057/58, $B = 1.14 T$)	64
7.7	Verteilung der Eintrittswinkel φ in die Oktanten des Barrels (Run 36057/58, $B = 1.14 T$)	65
7.8	Ereignis eines kosmischen Myonschauers mit mehreren sauberen Spuren im Barrel	67
7.9	Verteilung der Eintrittswinkel φ in die Oktanten der Endkappen (Run 20305ff., $B = 1.14 T$)	68

Tabellenverzeichnis

Bisherige Experimente der Hochenergiephysik	3
1.1 Elektronen- und Protonenvorbeschleunigung	6
1.2 Die wichtigsten Kenndaten der Hadron-Elektron-Ringanlage HERA	7
3.1 Charakteristische Parameter der H1-Kalorimeter	18
3.2 Erwartete Datenmengen der H1-Hauptkomponenten	20
5.1 Bedingungen des Kalibrationstriggers für die Barrelmodule	39
6.1 Definition der Oktanten in den Endkappen	48

Literaturverzeichnis

- [1] F. Halzen und A.D. Martin, Quarks and Leptons, John Wiley, New York (1984);
Ch. Quigg, Gauge Theories of the Strong, Weak and Electromagnetic Interactions,
Benjamin/Cummings (1983);
T.P. Cheng und L.F. Li, Gauge Theory of elementary particle physics,
Oxford University Press (1984). Phys. Lett. 112B (1982) 387.
- [2] Particle Data Group, Phys. Lett. 239B (1990) 1.
- [3] P. Schmüser, Zur Fertigstellung von HERA, Phys. Bl.46-12-1990, 470ff.
- [4] Proceedings of the HERA Workshop 1991 Vol. 2
- [5] Proceedings of the HERA Workshop 1991 Vol. 3
- [6] J. Tutas, Aachen, Myonen im H1-Detektor, Dissertation 1991, PITHA 91/10
- [7] T. Köhler, Aachen, Ereignisgeneratoren zur Elektron-Proton-Streuung bei HERA,
Diplomarbeit 1989, unveröffentlicht
- [8] E. Theuer, Aachen, Monte-Carlo-Untersuchungen der W -Boson-Produktion und
konkurrierende Prozesse bei HERA, Diplomarbeit 1991, unveröffentlicht.
- [9] The H1-Calorimeter Group: The H1 Liquid Argon Calorimeter System, erscheint in
Nucl. Instr. & Meth.
- [10] F.W. Brasse, The H1-Detector at HERA, Beitrag zur Rochester Conference for HEP,
Dallas 1992, Interner Bericht H1-10/92-245.
- [11] Technical Progress Report, H1 Collaboration, Oktober 1987.
- [12] H. Bergstein, Aachen, private Mitteilung.
- [13] Die IBM 3390/2 am Rechenzentrum des DESY in Hamburg
- [14] A. Campbell et al., A sheme for integrating the H1 trigger, DAQ and the processor
farm, interner Bericht H1-09/87-70, Hamburg 1987, unveröffentlicht.
- [15] Interne H1-Berichte (alle Hamburg, unveröffentlicht)
The H1 trigger control system, H1-12/88-101,
The H1 trigger logic hardware, H1-05/89-111,
The H1 trigger, a compendium for specialists and non-specialists, H1-11/90-157.

- [16] V. Blobel, Interner Bericht, DESY R1-88-01.
- [17] E. Iarocci et al., Plastic Streamer Tubes and their Applications in High Energy Physics, Nucl. Instr. & Meth. A217 (1983), ??? .
- [18] F. Norpoth, Hamburg, Hochspannungsregelung der Streamerrohrkammern des H1-Detektors, Diplomarbeit 1992, unveröffentlicht.
- [19] S. Zitzen, Aachen, Untersuchungen zum Streamermoder von Gasentladungsdetektoren, Entwicklung und Überprüfung eines numerischen Modells zur Quantitativen Beschreibung von Gasentladungsdetektoren, Dissertation 1992.
- [20] B. Krames, Aachen, Untersuchungen zum Streamermechanismus und zur Optimierung der Betriebseigenschaften der H1-Müon-Kammern, Diplomarbeit 1992, unveröffentlicht.
- [21] A.G. Frodesen, O. Skjeggstad und H. Tøfte, Probability and Statistics in Particle Physics, Universitetsforlaget (1979).
- [22] H1REC Manual in HERA01.H1SIM.GUIDE, IBM im DESY-Computer-Center.
- [23] R. Herma, Aachen, Simulation von Myonen im H1-Detektor, Diplomarbeit 1989, unveröffentlicht.
- [24] J. Tutas, Hamburg, private Mitteilung.
- [25] CERN Computer Center Program Library 03.10.1989
- [26] H1SIM Manual in HERA01.H1SIM.GUIDE, IBM im DESY-Computer-Center.
- [27] L. Büngener, Hamburg, Interkalibration der Türme des H1-Tailcatchers, Diplomarbeit 1992, unveröffentlicht.
- [28] O. Dünger, Hamburg, private Mitteilung.
- [29] C. Keuker, Aachen, Untersuchungen von Myonpaaren im H1-Detektor, Diplomarbeit in Vorbereitung.
- [30] LOOK Manual in HERA01.H1.LOOK.MANUAL, IBM im DESY-Computer-Center.

Danksagung

An dieser Stelle möchte ich allen danken, die zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen haben.

Herrn Prof. Ch. Berger danke ich für die wirklich interessante und fordernde Aufgabenstellung und sein Interesse am Fortgang dieser Arbeit. Meinem Betreuer Herrn Dr. F. Raupach danke ich für die Anregungen und die Kritik, aber auch für die Freiheit und das Vertrauen in mich beim Lösen der gestellten Aufgabe. Mein besonderer Dank gilt auch Herrn Dr. Jörg Tutas für die unzähligen Informationen die Hardware betreffend und die fruchtbaren Diskussionen in der Entstehungszeit dieser Arbeit. Bei den Mitarbeitern des I. Physikalischen Instituts bedanke ich mich für die unkomplizierte Zusammenarbeit und die vielen kleinen nicht auflistbaren Diskussionen und privaten Mitteilungen, besonders bei Helmut Bergstein, Rainer Herma, Martin Hampel, Claus Keuker, Klaus Rabbertz, Konrad Rosenbauer und Dr. Engelbert Vogel. Meinen Eltern danke ich für ihre fortwährende Unterstützung, ohne die es nie zu dieser Arbeit gekommen wäre.

Andrea danke ich für ihr Verständnis und ihre Geduld, vor allem während der letzten Wochen der Entstehung dieser Arbeit.

Lebenslauf

Am 9. August 1966 wurde ich als zweites Kind von Ingrid geb. Dieckmann und Günther Itterbeck in Hilten (heute Neuenhaus-Hilten), Kreis Grafschaft Bentheim geboren.

Ab 1970 wohnhaft in Uelsen besuchte ich dort von 1973 bis 1977 die Grundschule und anschließend bis 1979 die Orientierungsstufe. Von 1979 bis 1983 besuchte ich den Schulzweig Gymnasium der Kooperativen Gesamtschule Neuenhaus, von 1983 bis zur Erlangung der Allgemeinen Hochschulreife 1986 die Gymnasiale Oberstufe.

Im Wintersemester 1986/87 nahm ich das Studium der Physik an der RWTH Aachen auf, wo ich im Herbst 1988 die Vordiplomprüfungen ablegte. Während des Hauptstudiums war ich als Studentische Hilfskraft tätig, zunächst im Institut für Theoretische Elektrotechnik, nach Beginn des Physikalischen Hauptpraktikums dann seit Herbst 1991 im Physikpraktikum für Ingenieure und Mediziner des I. Physikalischen Instituts.