

**Untersuchungen
zum Betrieb
der
Streamerrohrkammern
am H1 Detektor**

Experimentelle physikalische Diplomarbeit
vorgelegt von

Uwe Wolter

II. Institut für Experimentalphysik
Universität Hamburg

Hamburg 1993

Inhaltsverzeichnis

1. Einleitung	3
1.1. Der Elektron-Proton Speicherring HERA.....	3
1.2. Der H1-Detektor.....	5
1.3. Das Instrumentierte Eisen des H1	5
1.4. Überwachung und Regelung der Streamerrohrkammern im Instrumentierten Eisen.....	9
2. Aufgabenstellung	11
3. Physikalische Grundlagen	12
3.1. Streamerrohrkammern	12
3.2. Verwendete Teilchenquellen	15
4. Meßapparatur.....	19
4.1. Die Monitorkammern	19
4.2. Der Laboraufbau	20
4.3. Die Monitorkammern am H1	25
4.4. Verfahren zur Spektrenauswertung.....	27
5. Ergebnisse	31
5.1. Verhalten einer Monitorkammer bei kosmischer Strahlung und β -Bestrahlung.....	31
5.2. Vergleich von Gaskreisläufen des Instrumentierten Eisens.....	34
5.3. Analyse von Daten der Streamerrohrkammer-Überwachung	36
5.4. Entstehung der Pulshöhenspektren des H1 Restkalorimeters	42
6. Zusammenfassung.....	45
Abbildungsverzeichnis	47
Literaturverzeichnis.....	49

1. Einleitung

1.1. Der Elektron-Proton Speicherring HERA

Im Hadron-Electron-Ring-Accelerator HERA werden Elektronen auf eine Energie von 30 GeV, Protonen auf 820 GeV beschleunigt und zur Kollision gebracht. Zur Vorbeschleunigung der Teilchen werden unter anderem das Synchrotron DESY und der Speicherring PETRA verwendet.

HERA ist der erste und bisher einzige Elektron-Proton Speicherring. Es werden durch die Schwerpunktsenergie von maximal $\sqrt{s} = 314$ GeV kinematische Bereiche erschlossen, die mit den bisherigen Experimenten zur Lepton-Hadron Streuung nicht erreichbar waren. Physikalisches Ziel des Experimentes ist unter anderem die Untersuchung der Struktur des Protons und seiner Bestandteile, die erreichte Ortsauflösung liegt bei 10^{-18} m.

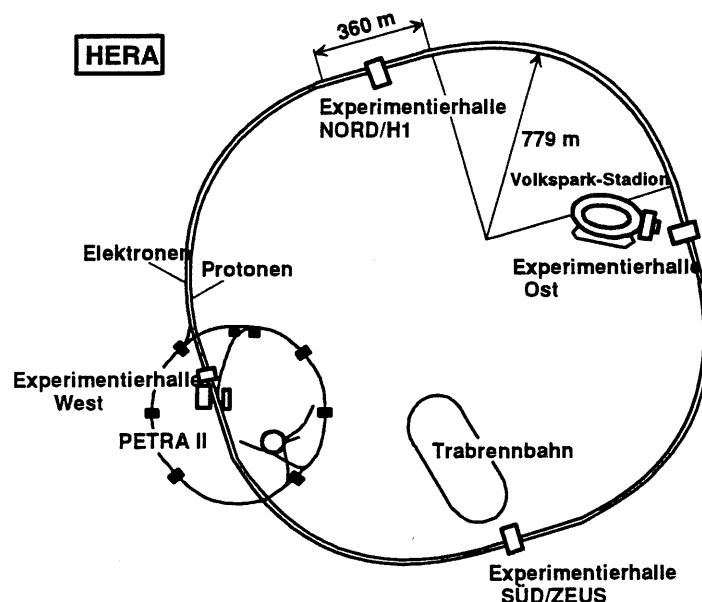
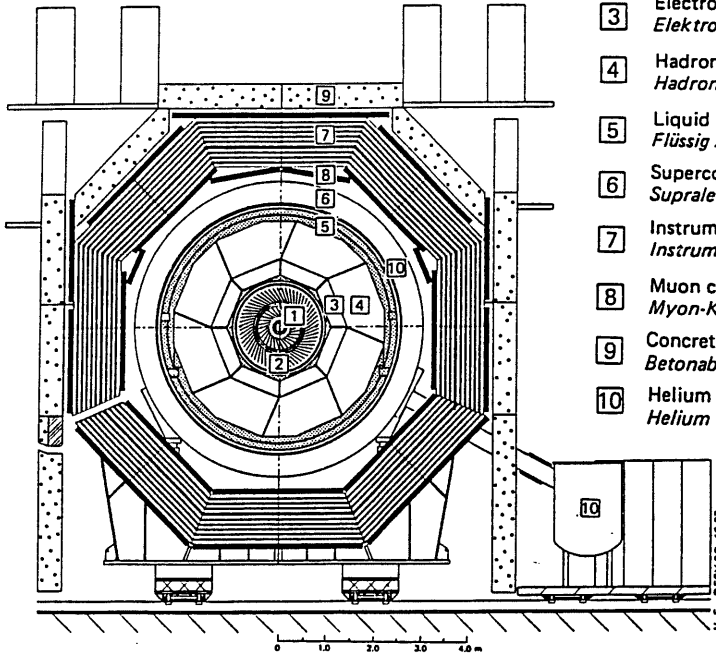


Abbildung 1.1 : HERA

Der HERA-Tunnel hat einen Umfang von 6,3 km und verläuft 10-25m unter dem Erdboden. Die Teilchen durchlaufen den Ring in getrennt gelenkten und fokussierten Strahlen in entgegengesetzten Richtungen. Die Strahlen bestehen derzeit (Herbst 1993) aus jeweils 90 'Teilchenpaketen'. Vorgesehen sind 210 Pakete, mit denen die geplante Luminosität von $1,5 \cdot 10^{31} \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$ erreicht wird. Die Strahlen können in vier Wechselwirkungspunkten in den Experimentierhallen zur Kollision gebracht werden.

Cross section/Querschnitt.

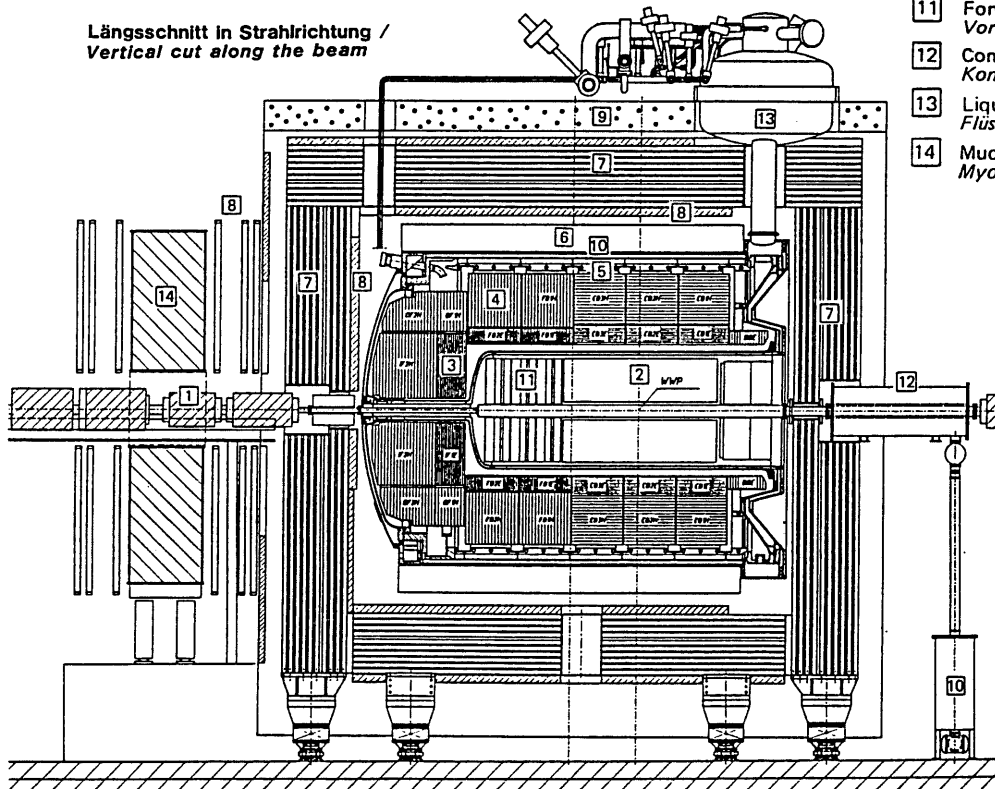


- 1 Beam pipe and beam magnets
Strahlrohr und Strahlmagnete
- 2 Central tracking chambers
Zentrale Spurenkammern
- 3 Electromagnetic Calorimeter (lead)
Elektromagnetisches Kalorimeter (Blei)
- 4 Hadronic Calorimeter (stainless steel)
Hadronisches Kalorimeter (Edelstahl)
- 5 Liquid Argon cryostat
Flüssig Argon Kryostat
- 6 Superconducting coil (1.2 T)
Supraleitende Spule (1,2 T)
- 7 Instrumented Iron (iron stabs + streamer tube detectors)
Instrumentiertes Eisen (Eisenplatten + Streamerröhren-Detektoren)
- 8 Muon chambers
Myon-Kammern
- 9 Concrete shielding
Betonabschirmung
- 10 Helium cryogenics
Helium Kälteanlage

Liquid Argon
Flüssig Argon

Experiment H1

Längsschnitt in Strahlrichtung /
Vertical cut along the beam



- 11 Forward tracking + TRD
Vorwärts-Spurenkammern
- 12 Compensation Coil
Kompensationsspule
- 13 Liquid Argon Cryostat
Flüssig-Argon-Kryostat
- 14 Muon Toroid Magnet
Myon Toroid Magnet

Abbildung 1.2 : Der H1-Detektor

In zwei dieser unterirdischen Hallen sind die Experimente ZEUS und H1 aufgebaut, vielkomponentige Detektoren, deren Aufgabe der möglichst vollständige Nachweis und die Vermessung der bei der ep-Streuung entstehenden Teilchen ist.

1.2. Der H1-Detektor

Der Detektor H1 (Abb. 1.2) umfaßt Elemente zur Spur- und Energiemessung von Elementarteilchen. Die Anordnung der Detektorelemente um das Strahlrohr ist weitgehend radialsymmetrisch. Entlang des Strahlrohres hingegen ist die Anordnung asymmetrisch, da sich der Kollisionsschwerpunkt von Elektronen und Protonen in Richtung des Protonenimpulses bewegt.

Ausgehend vom Wechselwirkungspunkt verlassen die Teilchen das Strahlrohr (1) und durchlaufen zunächst Elemente zur Spurbestimmung (und zum Teil zur Messung von dE/dx) (2,11).

Daraufhin erreichen sie die Kalorimeter (3,4) in denen ihre Energie durch Schauerbildung bestimmt wird. Hadronisches und Elektromagnetisches Kalorimeter sind aus abwechselnden Schichten von Edelstahl bzw. Blei und flüssigem Argon aufgebaut (Sampling Kalorimeter). Das Argon wird durch den Kyrastaten (5,13) gekühlt.

Die bisher genannten Komponenten sind zylindrisch von der supraleitenden Spule (6) umgeben, sie erzeugt in ihrem Inneren ein Feld von 1,2 T. Das B-Feld dient der Messung der Teilchenimpulse aus ihrer Spurkrümmung. Einflüsse des Feldes auf den Strahl werden durch einen Kompensationsmagneten (12) ausgeglichen.

Die Anordnung der Kalorimeter innerhalb der Spule hat zwei Vorteile : Einerseits wird das benötigte Kalorimetervolumen verringert, andererseits beeinflusst weniger Material durch Vielfachstreuung die Teilchen vor dem Eintritt in das Kalorimeter.

Das Eisenjoch (7) umgibt die Spule, es dient der Rückführung des magnetischen Flusses. Es ist mit Streamerrohrkammern bestückt ('Instrumentiertes Eisen'), die einerseits der Vermessung von Myonenspuren, andererseits als sogenanntes Restkalorimeter ('tailcatcher') des hadronischen Kalorimeters dienen.

Dem Nachweis und der Impulsmessung von Myonen dient das Vorwärts-Myonen Spektrometer (8,14).

Der gesamte Detektor ist mit einer Abschirmung aus Betonquadern (9) umgeben.

1.3. Das Instrumentierte Eisen des H1

Das Instrumentierte Eisen besteht aus abwechselnden Lagen von Eisenplatten und Streamerrohrkammern. Diese Schichtung ist in Abbildung 1.2 (7) angedeutet. Es beinhaltet etwa 100.000 Streamerrohre mit einer Fläche von 4000 m².

Bei den Streamerrohrkammern (limited streamer tubes) handelt es sich um eine spezielle Art von Gasionisationskammern, deren Aufbau im Folgenden beschrieben wird, ihre Funktionsweise wird im Kapitel 3.1 erklärt. Die Kammern sind eine Weiterentwicklung der 'Iarocci-Kammern' [IAR83]. Sie wurden zuerst im Protonenzerfall Experiment, das im Mont Blanc Tunnel aufgebaut ist, eingesetzt .

Die Streamerrohrkammern

Ein Streamerrohr (Abbildung 1.3) besteht aus einem Gasvolumen von $9 \times 9 \text{ mm}^2$ Querschnitt, das von 1 mm dicken Kunststoffwänden (1,2) umgeben ist. Aus Gründen des Brandschutzes findet anstelle des PVC der Iarocci-Kammern der halogenfreie Kunststoff LURANYL[®] Verwendung. Der Anodendraht (3) aus 0,1 mm starkem versilberten Cu-Be-Draht ist in Längsrichtung des Rohres mit 1,8 N gespannt und wird alle 40 cm durch Halterungen in der Mitte des Rohrquerschnittes zentriert.

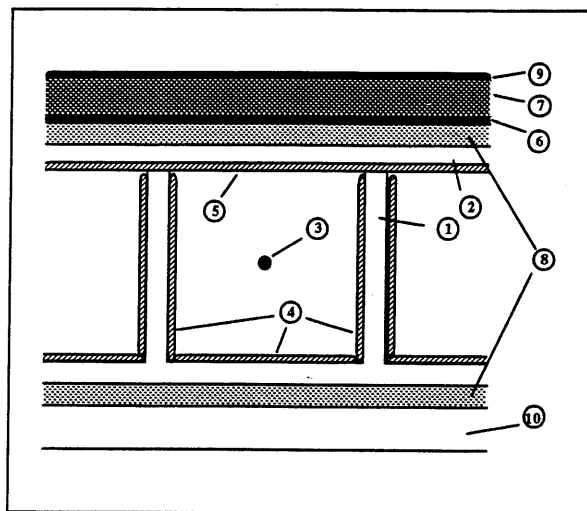


Abbildung 1.3 : Streamerrohr im Querschnitt (schematisch)

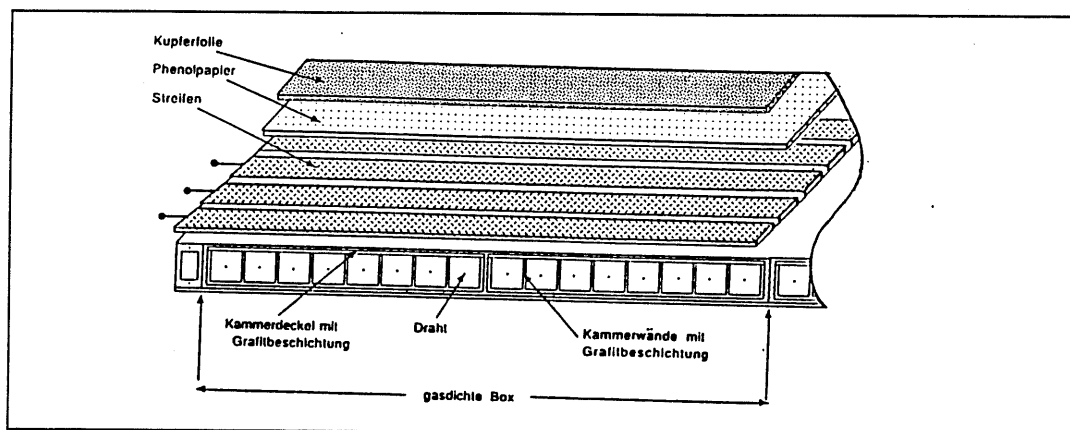


Abbildung 1.4 : Streamerrohrkammer Element

Die Kathode wird durch die Graphitbeschichtung der Kammerinnenseite (4,5) gebildet. Sie weist am Deckel einen Flächenwiderstand von $10 \text{ M}\Omega/\text{cm}^2$ (5), am Profil hingegen $10 \text{ k}\Omega/\text{cm}^2$ (4) auf.

Die Auslese der Kammer [GES90] erfolgt einerseits digital über einen Arbeitswiderstand (220Ω) am Anodendraht, andererseits analog oder digital über Influenzelektroden, die durch eine $35 \mu\text{m}$ Kupferkaschierung (6) des Phenol-

papieres (7) realisiert sind. Die Influenz aus dem Kammerinneren auf die Influenzelektroden wird durch den hohen Flächenwiderstand der Graphitbeschichtung des Deckels ermöglicht.

Ein Profil besteht aus acht nebeneinander liegenden Streamerrohren, zwei Profile sind in einer gasdichten Box (8) zu einem 'Element' zusammengefaßt.

Mehrere Elemente sind auf einem Al-Blech (10, siehe auch Abbildung 1.4) zur mechanischen Stabilisierung montiert, es liegt, wie die obere Kaschierung (9) des Phenolpapiers, zur Abschirmung auf Erdpotential.

Anordnung der Streamerrohrkammern im Eisenjoch

Das Eisenjoch ((7) in Abbildung 1.2) hat einen achteckigen Querschnitt, die Mantelfläche wird als Barrel bezeichnet, die Deckelflächen heißen Endcaps (Abbildung 1.6). Das Eisenjoch besteht aus 75 mm starken Eisenplatten, in deren Zwischenräumen Streamerrohrkammern montiert sind; darüber hinaus befinden sich an der Innen- und Außenseite Streamerrohrkammern (Abbildung 1.5).

Alle Anodendrähte verlaufen waagrecht, die Influenzelektroden sind in zwei Formen realisiert : Streifen von 17 mm Breite, die senkrecht zu den Drähten verlaufen ('strips'), sowie Rechtecke von 25×25 cm² bis 40×50 cm² Größe ('pads').

Die Streifen dienen der Bestimmung der dritten Koordinate der Myonenspuren, sie werden digital ausgelesen. Die Pads dienen der Auslese des Restkalorimeters. Dafür werden die Signale von 5 oder 6 radial aufeinander folgenden Pads aufsummiert. Die Auslese dieser Summensignale erfolgt analog. Diese Zusammenfassung mehrerer Pads zu 'Türmen' dient ebenso wie die große Fläche der Pads einer Verringerung der Anzahl der Auslesekanäle des Restkalorimeters.

Die Abbildung 1.5 zeigt schematisch die radiale Anordnung der Streamerrohrkammern für ein Barrel-Segment des Eisenjochs, im Endcap ist sie geringfügig anders.

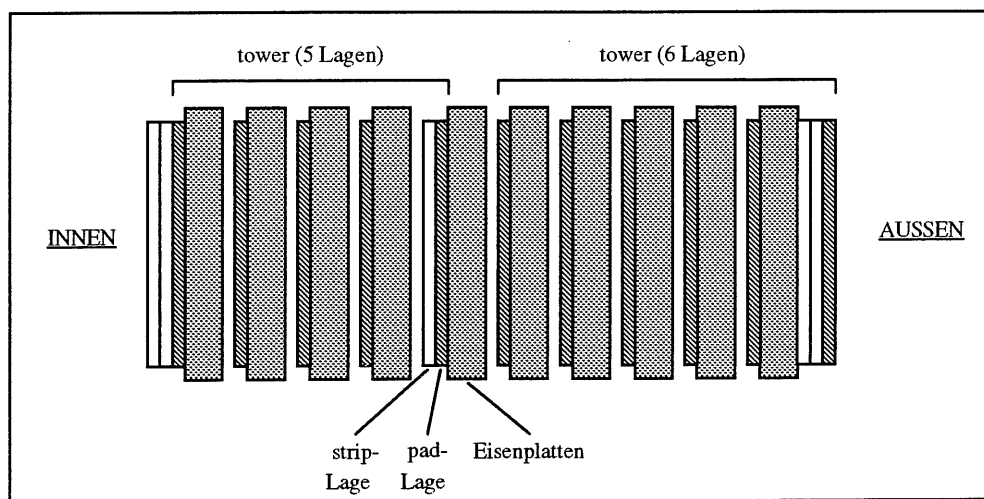


Abbildung 1.5 : Anordnung der Streamerrohrkammern im Instrumentierten Eisen (Barrel)

Gasversorgung der Streamerrohrkammern

Bei der Auswahl des Füllgases der Streamerrohrkammern haben Brandchutzaspekte ebenfalls eine Rolle gespielt: Anstelle des 'Standardgases' (75%

Isobutan C_4H_{10} , 25% Argon) wird das dreikomponentige 'H1-Mischgas' (88% Kohlendioxyd CO_2 , 9,5% Isobutan, 2,5% Ar) verwendet [TUT92].

Die Kammern arbeiten mit dem H1-Mischgas, verglichen mit dem Standardgas, in einem engeren Hochspannungsbereich. Im Interesse eines stabilen Betriebes werden die Kammern mit einer geringeren Spannung betrieben, als es für die ausschließliche Ausbildung von Streamerentladungen nötig wäre. So kommt es zum Teil zu Proportionalentladungen, was zu einer Verringerung der Nachweiswahrscheinlichkeit führt[DÜN90].

Das Gas wird am Detektor aus seinen Komponenten gemischt, der Isobutangehalt wird ständig durch Infrarot-Absorptionsanalyse überwacht.

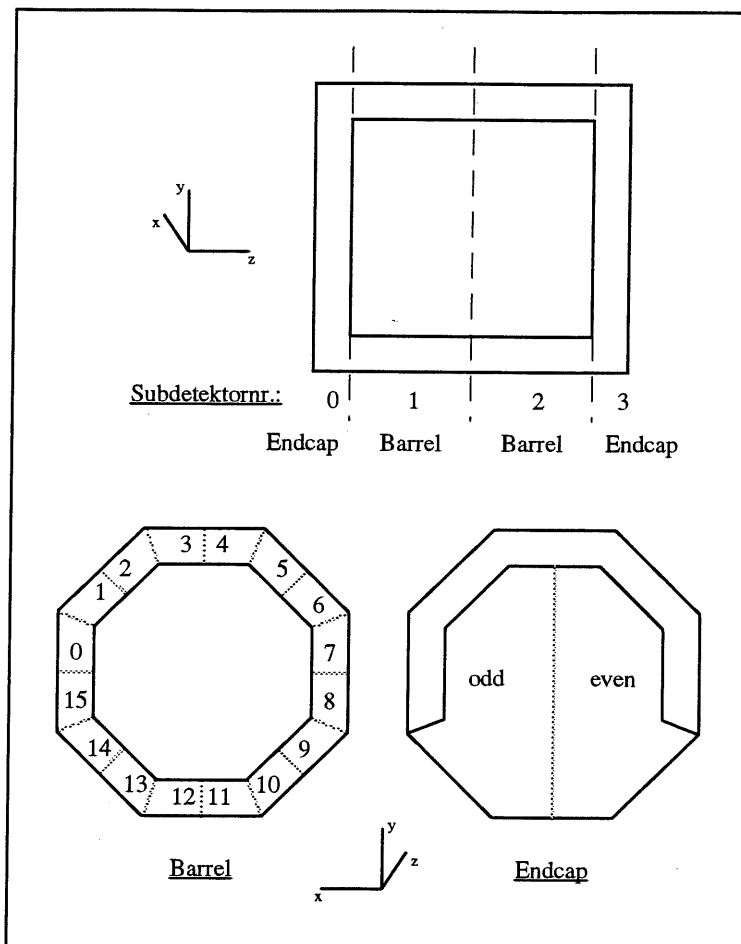


Abbildung 1.6 : Zur Bezeichnung der Gaskreisläufe des instrumentierten Eisens

(die z-Achse des Dreibeins gibt die Richtung des Protonenstrahls an)

Die Streamerrohrkammern werden zu Gaskreisläufen mit gemeinsamen Gasein- und Ausgängen zusammengefasst. Das Volumen der Kreisläufe liegt zwischen 150 ℓ und 250 ℓ . Abbildung 1.6 illustriert die Aufteilung des instrumentierten Eisens in diese Kreisläufe. Eine grobe Aufteilung erfolgt in Endcaps (Subdetektornummer 0 & 3) und Barrel-Hälften (Subdetektornummer 1 & 2). Das Barrel ist in 16 Halb-oktanten (0-15) unterteilt, die Endcaps in jeweils zwei senkrechten Hälften (odd/even). Innerhalb dieser Unterteilung besteht ein Kreislauf im Barrel aus 3 bis 6 benachbarte Lagen von Streamerrohrkammern, im Endcap aus einer Lage.

Das Gas wird über fünf Verteiler durch die Kreisläufe geleitet. Jeder Verteiler versorgt einen Teilbereich des Instrumentierten Eisens, diese Bereiche werden als 'Cluster' A bis E bezeichnet.

Hier sei der vom Cluster C versorgte Bereich des Instrumentierten Eisens angegeben [DÜN92]. An diesem Cluster wurden die in Kapitel 5.2 beschriebenen Messungen durchgeführt. Er umfaßt im Subdetektor 2 die Halboktanten 15, 0, 1, 2, 3, sowie im Subdetektor 3 die Endcap-Hälfte 'odd'.

Die gesamte Durchflußmenge durch das Gassystem beträgt ca. 1,5 m³/h, bei einem Gesamtvolumen von etwa 240 m³ [TUT92]. Das Gas strömt nach dem Durchlaufen eines Kreislaufes ins Freie, eine teilweise Wiederverwendung ist geplant.

Hochspannungsversorgung der Streamerrohrkammern

Die Hochspannungsversorgung erfolgt durch 200 Hochspannungskanäle (0-6 kV, max. 200µA) bei ca. 4,5 kV. Der Maximalstrom eines Kanals ist auf 5µA eingestellt. Überschreitet ein Kanal diesen Strom ('tripping'), wird seine Spannung heruntergeregelt; ist das länger als eine Minute notwendig, so wird die Spannung abgeschaltet, um eine eventuelle Zerstörung der zugehörigen Kammern zu verhindern.

Bei der Füllung der Speicherringe, oder bei instabilen Strahleigenschaften, wird die Hochspannung der Streamerrohrkammern stark reduziert. Das soll eine Beschädigung der strahlernen Kammern durch den erhöhten Teilchenfluß verhindern.

1.4. Überwachung und Regelung der Streamerrohrkammern im Instrumentierten Eisen

Überwachung

Die Steuerung und Überwachung der Streamerrohrkammern des Instrumentierten Eisens erfolgt durch den Myon-Slow-Control (µSC) Rechner. Er ist Bestandteil des H1-Kontrollsystems ('slow control'), das den Zustand aller Detektorkomponenten überwacht, regelt und protokolliert.

Durch den µSC Rechner werden unter anderem folgende Größen im Abstand von 15 Minuten aufgezeichnet: Die Temperatur in der Nähe des Hallenbodens und auf Höhe der Oberseite des Detektors, der Luftdruck und die Sollspannung der Hochspannungskanäle.

Im Gaseingang eines Clusters sowie im Gasausgang eines Gaskreislaufes sind Monitorkammern (siehe Kapitel 4.1) installiert, deren Pulshöhenspektren ausgewertet werden. Die Ergebnisse dieser Auswertung werden ebenfalls protokolliert und lösen bei einer vorgegebenen Abweichung vom Sollwert eine Fehlermeldung aus. Aufgabe dieser Monitorkammern ist die Überwachung der Füllgasqualität der Streamerrohrkammern, sie liefern aber z.B. auch Aufschluß über die Stabilität der Hochspannungsregelung.

Hochspannungsregelung

Wie in Kapitel 3.1 beschrieben, ist das Verhalten der Streamerrohrkammern abhängig von der Temperatur und dem Druck des Füllgases. Ausgehend von einer weitgehend konstanten Temperaturverteilung in den verschiedenen Bereichen des H1 Detektors wird eine Regelung der Hochspannung in Abhängigkeit vom

Luftdruck vorgenommen [NOR92]. Eine zusätzliche Regelung zur Kompensation von Temperatureinflüssen wäre ohnehin schwierig, da sie das komplizierte Verhalten der Temperaturverteilung bei lokalen oder globalen Änderungen der Temperatur berücksichtigen müßte.

Die Hochspannungsregelung stabilisiert das Verhalten der Streamerrohrkammern, was für die digitale (feste Schwellen), wie für die analoge Auslese wichtig ist. Außerdem verhindert die Regelung eine Destabilisierung der Streamerentladungen (Mehrfachstreamer, Funkenentladungen, siehe Kapitel 3.1) bei niedrigem Luftdruck, die zur Schutzabschaltung der jeweiligen Kanäle führen könnten.

Der Betrieb der Kammern erfolgt bei einer 'Normalspannung' von 4500V, die bei einem 'Normaldruck' von 1013 mbar eingestellt wird. Die luftdruckabhängige Abweichung ΔU von dieser Normalspannung wird aus der Abweichung Δp vom Normaldruck bestimmt :

$$\Delta U = C \cdot \Delta p$$

Die Regelungskonstante C betrug während der in Kapitel 5.2 beschriebenen Messungen 3 V/mbar, wurde später auf den in [NOR92] bestimmten Wert von 2,75 V/mbar eingestellt.

2. Aufgabenstellung

Aufgabe der vorliegenden Arbeit waren einige Untersuchungen zum Betrieb und zur Überwachung der im Instrumentierten Eisen des H1 Detektors installierten Streamerrohrkammern.

Behandelte Fragestellungen

Bei der Überwachung der Streamerrohrkammern des H1 Detektors werden sogenannte Monitorkammern verwendet (Kapitel 4.1). In diesen Monitorkammern werden Streamerrohre von einem β -aktiven Präparat bestrahlt.

Dagegen dienen die Kammern des Instrumentierten Eisens dem Nachweis von Myonen und hochenergetischen Hadronen (Restkalorimeter). In Kapitel 5.1 wird das Verhalten der Streamerrohrkammern beim Durchgang von Elektronen aus einem β -aktiven Präparat mit dem Verhalten beim Durchgang kosmischer Strahlung verglichen.

Die Überwachung des Streamerrohrkammer-Systems am H1 Detektor [LIP92] zeigt im überwachten Gaskreislauf eine Verschlechterung des Füllgases der Streamerrohrkammern auf dem Weg vom Gasein- zum Gasausgang. Diese Verschlechterung zeigte sich auch im Verhalten von Teilen des Restkalorimeters im Instrumentierten Eisen [BÜN92]. Im Kapitel 5.2 wird die Gasqualität am Ausgang verschiedener Gaskreisläufe verglichen, indem eine Monitorkammer mit dem jeweiligen Gas betrieben wird. Dabei wird insbesondere untersucht, ob eine Verschlechterung der Gasqualität in allen Kreisläufen erfolgt.

Die von der Überwachung des Streamerrohrkammer-Systems aufgezeichneten Daten liefern Aufschluß über die Betriebsbedingungen der Streamerrohrkammern, zum Beispiel über die Stabilität der Hochspannungsregelung. Im Kapitel 5.3 werden die über einen längeren Zeitraum aufgezeichneten Daten analysiert.

Die Pulshöhenspektren der Monitorkammern unterscheiden sich deutlich von den Spektren, die am H1 Restkalorimeter gemessen werden. Das hat zu gelegentliche Zweifeln an der Aussagekraft der mit den Monitorkammern gemessenen Spektren geführt. In Kapitel 5.4 wird der Zusammenhang der beiden Spektrenformen erläutert.

3. Physikalische Grundlagen

3.1. Streamerrohrkammern

Streamerrohrkammern sind Gasdetektoren, sie dienen dem Nachweis ionisierender Strahlung durch Gasentladungen. Diese Entladungen erfolgen in speziellen Gasmischungen in einem inhomogenen elektrischen Feld.

Streamerrohrkammern lassen sich als 'veränderte' Geiger-Müller Zählrohre verstehen, deshalb wird zunächst auf deren Funktion eingegangen [KNO89].

Zählrohre

Entlang der Spur eines geladenen Teilchens wird das Füllgas des Zählrohres (gewöhnlich ein Edelgas mit einer etwa zehnpromzentigen Beimischung eines mehratomigen 'Löschgases') ionisiert. In Abhängigkeit von der zwischen dem Anodendraht und der Kathode angelegten Betriebsspannung führen unterschiedliche Prozesse zu einem elektrischen Signal an den Elektroden des Zählrohres. Abbildung 3.1 zeigt die Signalladung als Funktion der angelegten Spannung.

Im Bereich II genügt das E-Feld, um die Elektron-Ion Paare zu trennen und zu den Elektroden zu führen. Die an der Teilchenspur getrennte Ladungsmenge (primäre Ladung) wird nicht verstärkt.

Im Proportionalbereich (III) setzt ein Verstärkungsmechanismus ein: Die primär erzeugten Elektronen gewinnen auf dem Weg zum Anodendraht soviel kinetische Energie, daß sie weitere Füllgasatome (bzw. Moleküle) ionisieren. Die so freigesetzten Elektronen können wiederum Füllgasatome ionisieren, die Anzahl der Elektron-Ion Paare wächst lawinenartig an. Auf diese Weise kann die primär erzeugte Ladung etwa 10^5 -fach verstärkt werden. Die Proportionallawinen sind eng begrenzt, sie haben Durchmesser von ca. $100\mu\text{m}$.

Durch Übergänge angeregter Atome oder durch Rekombination von Elektronen und Ionen kommt es zur Emission sichtbarer oder ultravioletter Photonen, die weitere Lawinen auslösen können. Das Löschgas hat hier die Aufgabe diese Photonen ohne Ionisation zu absorbieren, um die Entladung zu begrenzen.

Steigert man die Spannung weiter, so erreicht man den Geiger-Müller Bereich (IV). Hier kommt es verstärkt zur Emission von Photonen aus der Lawine. Diese Photonen ionisieren ihrerseits Füllgasatome und lösen weitere Lawinen aus, dadurch breitet sich die Entladung um den gesamten Anodendraht aus. Die Signalladung ist, im Gegensatz zum Proportionalbereich, unabhängig von der primären Ladung, es wird eine Verstärkung von 10^8 bis 10^{10} erreicht. Die Entladung stirbt aus, wenn die positive Raumladung der gering beweglichen Ionen um den Anodendraht so stark zugenommen hat, daß das E-Feld dort nicht mehr zur Lawinenbildung ausreicht.

Wenn die positiven Ionen an der Kathode neutralisiert werden, kann es zur Loslösung von Elektronen aus dem Kathodenmaterial kommen. Diese Elektronen würden erneute Entladungen auslösen. Das Löschgas hat im Geiger-Müller

Bereich die Aufgabe, die Ionen der übrigen Komponenten vor dem Erreichen der Kathode durch Umladungsstöße zu neutralisieren.

Oberhalb des Geiger-Müller Bereiches endet der Arbeitsbereich des Zählrohres, es kommt zu selbständigen Gasentladungen.

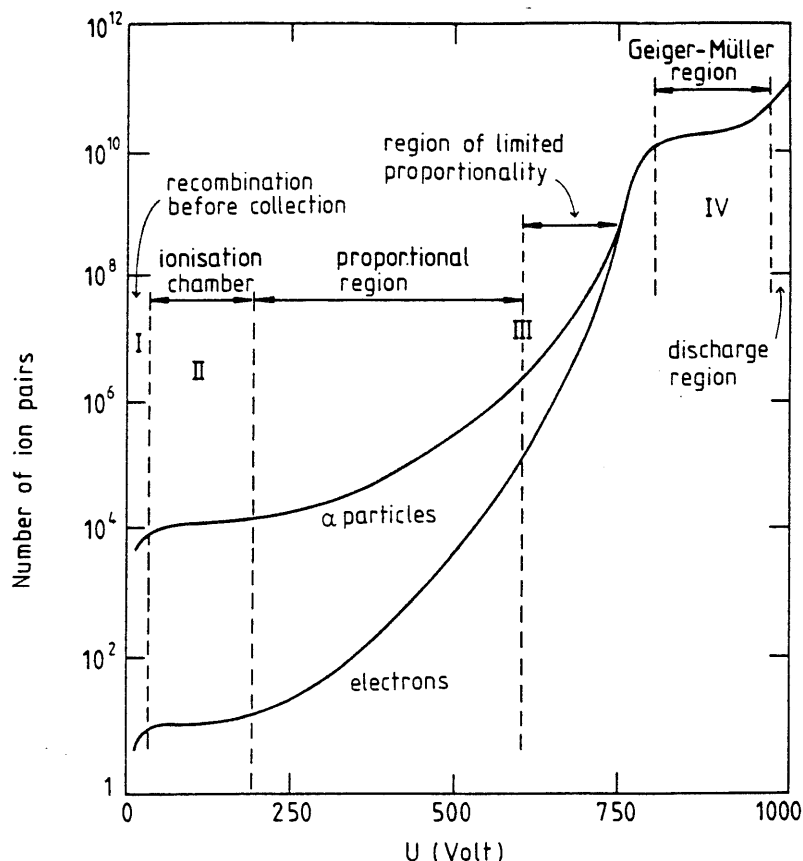


Abbildung 3.1 : Betriebsspannungskennlinie eines Zählrohres [KLE86]

Streamerentladungen

Erhöht man den Löschgasanteil in einem Zählrohr über etwa 50%, so verändert sich bei einigen Gasmischungen das Verhalten der Entladungen im Geiger-Müller Bereich. Die in der Elektronenlawine emittierten Photonen verlassen diese nicht mehr, sie ionisieren dort zum Teil weitere Füllgasatome, was die Anzahl der Elektronen in der Lawine erhöht. Die positive Raumladung der Füllgasionen zieht weitere Elektronen der primären Ionisation an, der Bereich der Entladung wächst als 'Schlauch' (Durchmesser ca. 200µm) auf die Kathode zu. Schließlich endet die Elektronenvermehrung wie bei Geiger-Müller Entladungen durch die positive Raumladung der Ionen (daher die Bezeichnung SQS : self quenching streamer).

Die Begrenzung des Entladungsvolumens ist vorteilhaft, da nach einem Teilchendurchgang nur ein kleiner Teil der Streamerrohrkammer unempfindlich ist.

Die Signalladungen der Streamerentladungen sind in Streamerrohrkammern etwa zehnmals größer als die der Proportionalentladungen. Die Größe der Streamerentladungen ist nur schwach von der primären Ionisation abhängig.

Wie bei Geiger-Müller Entladungen gibt es einen Übergangsbereich ('begrenzte Proportionalität' in Abb. 3.1), in dem sowohl Streamer- als auch Proportionalentladungen auftreten (Kapitel 4.4).

Bei höheren Betriebsspannungen werden zunächst durch einen Teilchendurchgang mehrere Entladungen ausgelöst ('Mehrfachstreamer'). Bei weiterer Erhöhung der Spannung kommt es auch hier zu selbständigen Entladungen.

Die Ausbildung von Streamerentladungen wird durch die Verwendung relativ dicker Anodendrähte, etwa 0,1mm, begünstigt. Das erhöht zudem die mechanische Stabilität des Drahtes.

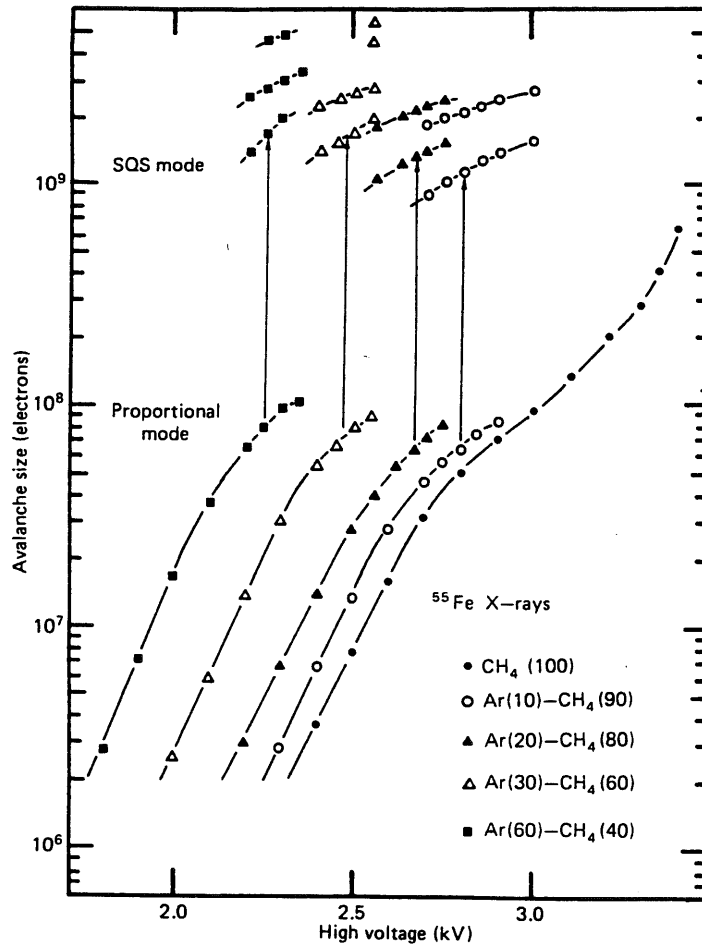


Abbildung 3.2 : Streamer- und Proportionalladung in Abhängigkeit von der Betriebsspannung [KNO89]

Abhängigkeit der Streamerladung von den Betriebsparametern der Streamerrohrkammer

Abbildung 3.2 zeigt die Anzahl der Elektronen in einer Proportional- bzw. Streamerentladung als Funktion der Betriebsspannung eines Streamerrohres. Die Kurven zeigen das Verhalten für unterschiedliche Füllgasmischungen.

Die Signalladung der Streamerentladungen hängt für eine gegebene Kammer neben der Gaszusammensetzung und der Betriebsspannung vom Druck und von

der Temperatur des Füllgases ab. Diese Abhängigkeiten resultieren aus einer Abhängigkeit von der Teilchenzahldichte des Füllgases.

In [NOR92] ist die Abhängigkeit der Streamerladung von Betriebsspannung, Druck und Temperatur für die H1-Streamerrohrkammern angegeben:

$$\begin{aligned} k_{HV} &= 0,44 \text{ \%}/V && \text{bei } 4500 \text{ V} \\ k_P &= -1,2 \text{ \%}/\text{hPa} && 1013 \text{ hPa} \\ k_T &= 4,0 \text{ \%}/K && 25 \text{ }^\circ\text{C} \end{aligned}$$

Diese Konstanten geben die relative Änderung des Mittelwertes N_{MW} des Pulshöhenspektrums einer Streamerrohrkammer (Bezeichnungen siehe Kapitel 4.4) bei Änderung des angegebenen Parameters an :

$$k_{HV} = \left(\frac{\Delta N_{MW}}{\Delta HV \cdot N_{MW}} \right)_{p,T=\text{const.}}$$

$$k_P = \left(\frac{\Delta N_{MW}}{\Delta p \cdot N_{MW}} \right)_{T,HV=\text{const.}}$$

$$k_T = \left(\frac{\Delta N_{MW}}{\Delta T \cdot N_{MW}} \right)_{p,HV=\text{const.}}$$

In [NOR92] sind ebenfalls die Abhängigkeiten der häufigsten Streamerladung (Streamerpeak) von den Betriebsparametern angegeben. Sie liegen in der gleichen Größenordnung.

3.2. Verwendete Teilchenquellen

Für die Messungen an den Streamerrohrkammern wurden entweder die von einem β -Präparat (^{90}Sr) emittierten Elektronen oder Teilchen der Kosmischen Strahlung verwendet. Im Folgenden werden die Eigenschaften dieser Quellen kurz dargestellt.

Dazu werden zunächst einige Mechanismen beschrieben, durch die geladene Teilchen beim Durchgang durch Materie Energie verlieren.

Wechselwirkung geladener Teilchen mit Materie

Durchqueren geladene Teilchen ein Medium mit dem sie nur elektromagnetisch wechselwirken, so verlieren sie im Wesentlichen durch zwei Prozesse Energie: Ionisation oder Anregung der Atome beziehungsweise Moleküle des Mediums und Emission von Bremsstrahlung.

Ein Teilchen emittiert Bremsstrahlung, wenn es im elektrischen Feld eines Atomkernes gebremst oder abgelenkt wird. Der dadurch hervorgerufene mittlere Energieverlust pro Weglänge $(dE/dx)_{\text{rad.}}$ nimmt mit der kinetischen Energie des Teilchens zu. Für Energien E , die groß gegen die Ruheenergie des Teilchens sind, gilt

$$-\left(\frac{dE}{dx} \right)_{\text{rad.}} \propto E$$

Erreicht die kinetische Energie die 'Kritische Energie' E_C , so ist $(dE/dx)_{\text{rad.}}$ gleich dem mittleren Energieverlust $(dE/dx)_{\text{ion.}}$ durch die Ionisation des Mediums (Kernladungszahl Z).

Für Elektronen gilt die Abschätzung [PER90]

$$E_c = \frac{600}{Z} \text{ MeV}$$

Da $(dE/dx)_{\text{rad.}}$ umgekehrt proportional zum Quadrat der Masse des beschleunigten Teilchens ist, liegt es bei gleicher Energie für Myonen um den Faktor

$$(m_e/m_\mu)^2 \approx 2 \cdot 10^{-5}$$

niedriger als für Elektronen.

Der mittlere Energieverlust eines einfach geladenen Teilchens der Geschwindigkeit $\beta=v/c$ ($\gamma=(1-\beta^2)^{-1/2}$) durch Ionisation oder Anregung wird durch die Bethe-Bloch Formel beschrieben:

$$-\left(\frac{dE}{dx}\right)_{\text{Ion.}} = 4\pi \cdot N_A \frac{e^4 c^2}{m_e} \cdot \rho \frac{Z}{A} \cdot \frac{1}{\beta^2} \cdot \left[\ln \frac{2m_e c^2 \beta^2 \gamma^2}{I} - \beta^2 \right]$$

Für Elektronen gilt eine andere Beziehung [KNO89]. Das Medium wird durch seine Dichte ρ , durch das Verhältnis Z/A von Kernladungs- und Massenzahl seiner Atome sowie durch ein mittleres Ionisationspotential I charakterisiert.

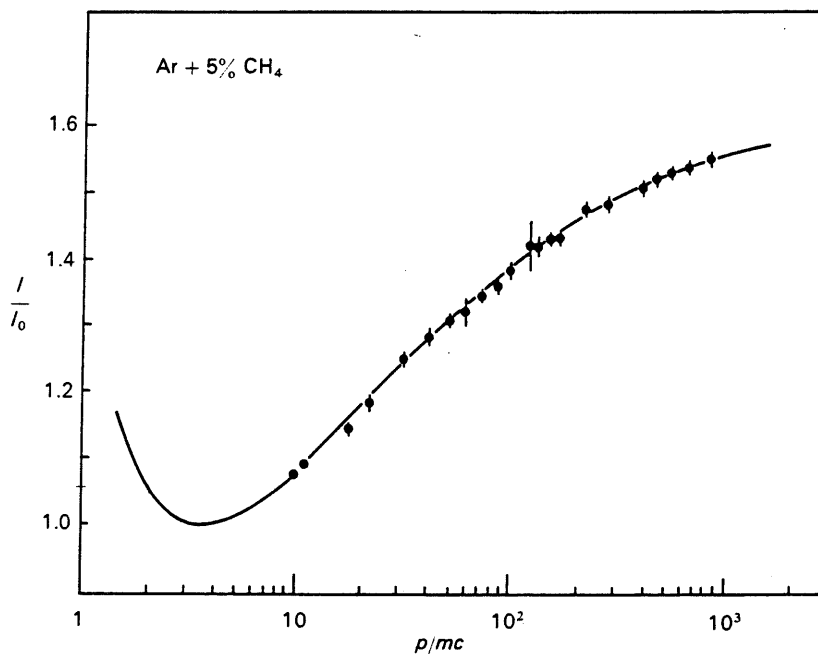


Abbildung 3.3 : Energieverlust durch Ionisation [PER87]

Abbildung 3.3 zeigt den so berechneten Energieverlust eines Teilchens in Argon ($I=26\text{eV}$) als Funktion von $\beta\gamma=p/mc$ (p ist der Impuls des Teilchens). Die Kurve erreicht ihr Minimum bei $\gamma=E/mc^2 \approx 3$, darauf folgt ein schwacher Anstieg, der für $\gamma \approx 1000$ etwa das eineinhalbfache des Wertes im Minimum erreicht. Teilchen, deren Energieverlust in der Nähe des Minimums liegt, werden minimalionisierend genannt.

Elektronen aus einem β -aktiven Präparat

Die beim β -Zerfall eines Nuklids emittierten Elektronen sind nicht monoenergetisch (Dreikörperzerfall), das Energiespektrum hat qualitativ das in Abbildung 3.4 gezeigte Aussehen.

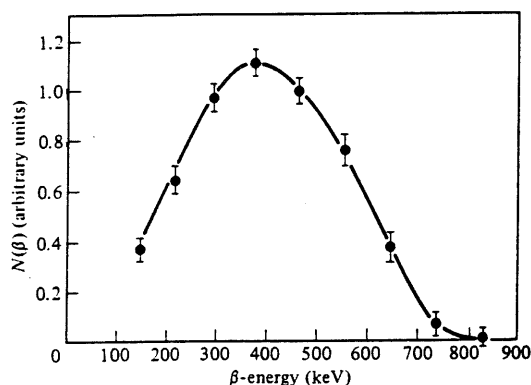


Abbildung 3.4 : Energiespektrum der Elektronen aus dem β -Zerfall von Neutronen [JEL90]

Die Elektronen aus der verwendeten β -Quelle ($E_{\max}=546\text{keV}$) verlieren gemäß der oben genannten Beziehungen nur wenig Energie durch Bremsstrahlung. Nach [BER64] beträgt der Anteil der Bremsstrahlungsverluste am gesamten Energieverlust für 550keV Elektronen in Argon etwa 1%. Um den Energieverlust der emittierten Elektronen im Füllgas der Streamerrohrkammern abzuschätzen, seien folgende Werte für Elektronen in Argon nach [BER64] angegeben :

Kinetische Energie	300keV :	$dE/dx = 1,7 \text{ MeV cm}^2/\text{g}$
	550keV :	$dE/dx = 1,4 \text{ MeV cm}^2/\text{g}$

Hier bezeichnet x die 'Massenbelegung' des durchquerten Mediums, das Produkt der 'geometrischen Weglänge' mit der Dichte des Mediums.

Kosmische Strahlung

Die Abbildung 3.5 zeigt die Zusammensetzung und die Energieverteilung der Kosmischen Strahlung auf Meereshöhe.

Eine mögliche Unterteilung der Kosmischen Strahlung erfolgt in eine 'harte Komponente', die ca. 10cm Blei durchdringt, und in eine 'weiche Komponente', die darin absorbiert wird. In [PAR90] sind folgende Flußdichten dieser Komponenten auf Meereshöhe angegeben (θ : Zenitwinkel, ϕ : Azimutwinkel)

	hart	weich	
$j(\theta=0,\phi)$	80	30	$\text{m}^{-2}\text{s}^{-1}\text{sterad}^{-1}$
J_1	130	50	$\text{m}^{-2}\text{s}^{-1}$

Dabei gibt j die pro Einheitsraumwinkel, pro Sekunde auf die Einheitsfläche treffende Teilchenzahl an. J_1 gibt die pro Sekunde auf eine waagerechte Einheitsfläche treffende Anzahl an, sie ergibt sich durch Integration von j über den oberen Halbraum:

$$J_1 = \int_{\theta \leq \frac{\pi}{2}} j(\theta, \phi) \cos \theta d\Omega$$

Für die Abschätzungen in dieser Arbeit wird vereinfachend angenommen, daß im Laboraufbau (vgl. Kapitel 4.2) nur die harte Komponente nachgewiesen wird. Sie besteht zu ca. 95% aus Myonen einer mittleren Energie von etwa 2 GeV, diese werden als minimalionisierend betrachtet. Die Häufigkeit dieser Myonen hängt nur vom Zenitwinkel ab, sie ist proportional zu $1/\cos^2\theta$.

Nach [PAR90] erleiden minimalionisierende Teilchen in Argon einen Energieverlust von

$$dE/dx = 1,5 \text{ MeV cm}^2/\text{g}$$

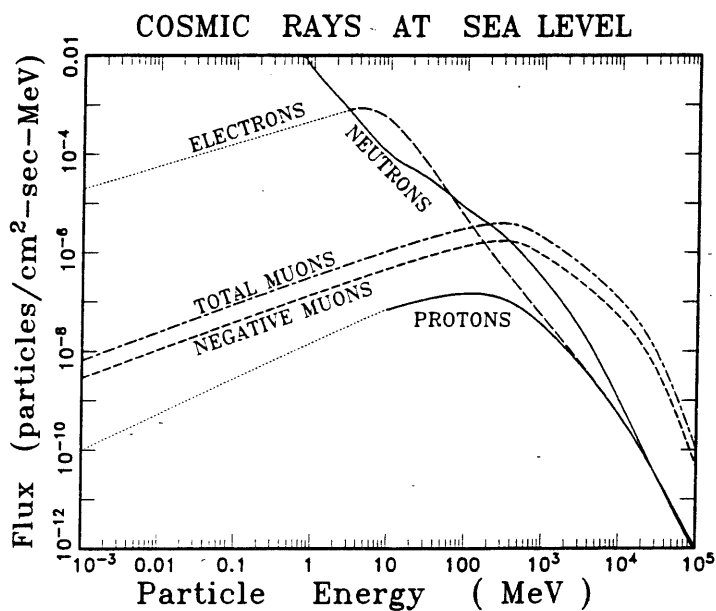


Abbildung 3.5 : Energiespektrum der kosmischen Strahlung auf Meereshöhe [ZIE81]

4. Meßapparatur

4.1. Die Monitorkammern

Abbildung 4.1 [LIP92] zeigt eine Monitorkammer, die in der Überwachung der Streamerrohrkammern am H1 Detektor verwendet wird. Sie besteht aus einem Profil (28 x 4 cm²) von vier Streamerrohren, das von einer Strontium⁹⁰ β -Quelle (546 keV, $T_{1/2} = 27,4$ a) bestrahlt wird. Zum gasdichten Abschluß der Anordnung, sowie zur Abschirmung der Quelle, sind diese Elemente von einem Aluminiumgehäuse umgeben.

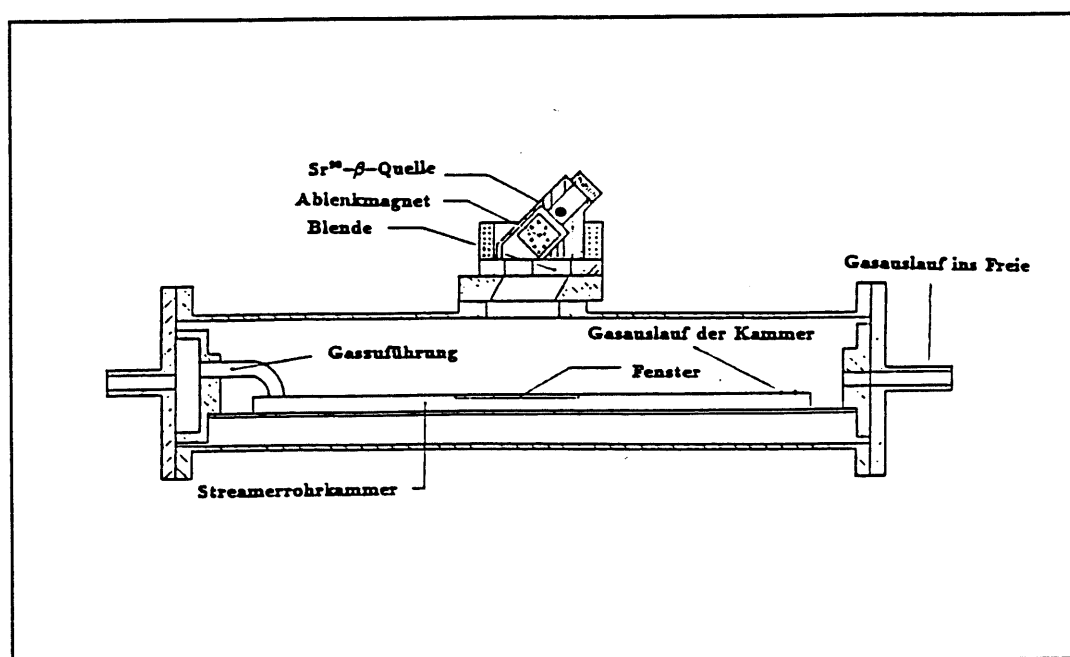


Abb. 4.1 : Monitorkammer (schematisch)

Der Ablenkmagnet dient der Aussonderung niederenergetischer Elektronen. Unterhalb der Quelle ist der Profildeckel auf eine Stärke von 0,2 mm abgefräst ('Fenster'), um die Abschwächung der Elektronenenergie zu verringern.

Die Kathode liegt über einen 2,5 M Ω Widerstand an der Hochspannung. Die vier Anodendrähte der Streamerrohre liegen parallel geschaltet am Ausgang und über einen 10 M Ω Widerstand an Masse. Das verhindert eine Aufladung der Drähte bei unbeschaltetem Ausgang.

Die Monitorkammern stammen aus dem Experiment CHARM II am CERN, wo sie für die Hochspannungsregelung der dortigen Streamerrohrkammern verwendet wurden. Abgesehen vom verwendeten Kunststoff (PVC) unterscheiden sich die Streamerprofile nicht von den H1-Streamerrohrkammern.

Die Kammern verhalten sich, je nach Exemplar, unterschiedlich, was z.B. durch Abbildung 4.2 belegt wird. Bei der dargestellten Messung wurden zwei Monitorkammern gleichzeitig an einem Gaskreislauf betrieben und zeigten dabei eine Abweichung der Lage des Streamerpeaks von 14 %.

Die Ursache dieses unterschiedlichen Verhaltens ist möglicherweise eine Verunreinigung des Anodendrahtes oder der Innenseite der Streamerrohre, da die Monitorkammern zum Teil bereits einige Jahre in Betrieb gewesen sind.

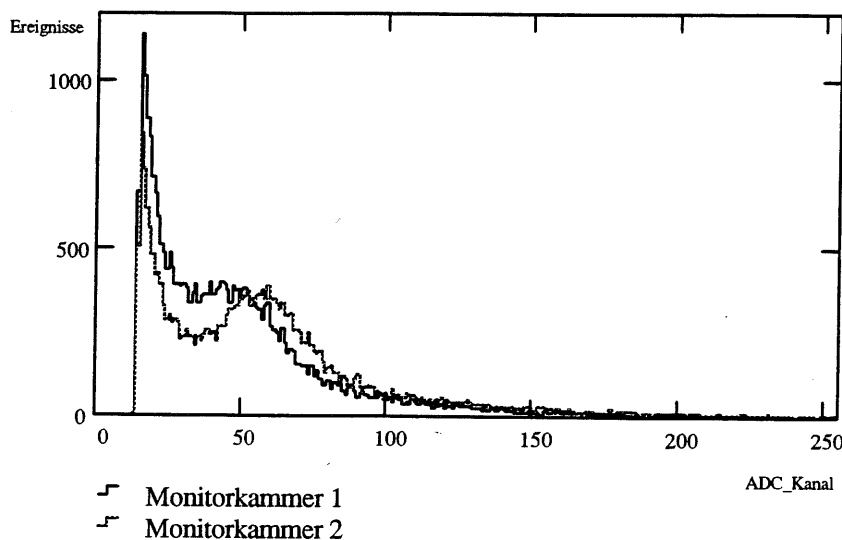


Abb. 4.2 : Zu den Unterschieden der Monitorkammern

4.2. Der Laboraufbau

Mit Hilfe des Laboraufbaus wurden Pulshöhenspektren von Monitorkammern gemessen. Die Messungen erfolgten bei Bestrahlung durch die eingebaute β -Quelle oder durch kosmische Strahlung (siehe Kapitel 3.2), in diesem Fall wurde die Quelle ausgebaut. Zur Feststellung des Durchganges von Myonen durch die Kammer wurde die Koinzidenz zweier Szintillationsdetektoren, ausgelesen durch Photomultiplier, mit dem Kammersignal benutzt.

Anordnung der Szintillatoren

Abbildung 4.3 zeigt die für Messungen mit kosmischer Strahlung verwendete Anordnung der Szintillatorplatten. Diese Anordnung existierte bereits, der Abstand der Szintillatorplatten voneinander war nicht veränderlich.

Abschätzung der Ereignisrate bei Messung mit kosmischer Strahlung:

Eine 'Monte-Carlo Simulation' der dargestellten Anordnung wurde durchgeführt. Mit der Annahme, daß die Häufigkeit der einfallenden Teilchen, die den Aufbau durchdringen wie der \cos^2 des Zenitwinkels abnimmt, liefert sie :

32% der auf den oberen Szintillator fallenden Teilchen treffen auch den unteren, 8,8% durchlaufen zusätzlich das Monitorkammer-Profil, können also eine Koinzidenz auslösen.

Ausgehend von einer 90% Nachweiswahrscheinlichkeit der Monitorkammer [KRA92], verringert sich dieser Wert auf $0,9 \cdot 8,8\% = 7,9\%$.

Nimmt man die Flußdichte einfallender Teilchen auf den oberen Szintillator als $J_1 = 130 \text{ m}^{-2}\text{s}^{-1}$ an (Kapitel 3.2), so führt das auf eine Rate von 10 min^{-1} für die Koinzidenzen der beiden Szintillatoren mit der Monitorkammer. Dieser Wert stimmt recht gut mit den gemessenen Raten überein (Kapitel 5.1).

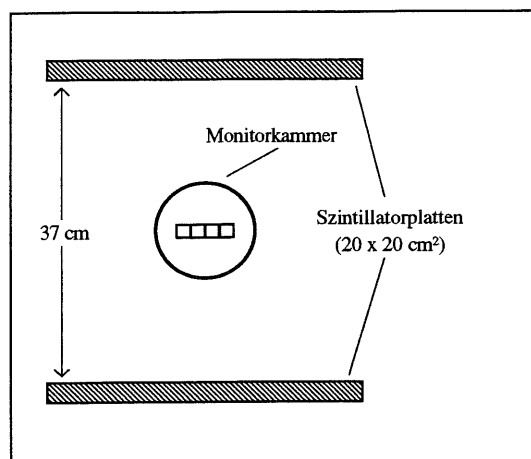


Abbildung 4.3 : Anordnung der Szintillatorplatten im Laboraufbau (schematisch)

Gas- und Hochspannungsversorgung der Monitorkammer

Das H1 Mischgas wurde vom DESY Gaslager vorgemischt bezogen (40l-Flaschen mit 18,8 bar Fülldruck). Bei der Lagerung des Gases ist darauf zu achten, daß die Temperatur etwa 10°C nicht unterschreitet, da es sonst zu einer irreversiblen Entmischung durch Auskondensieren des Isobutans (Partialdruck ca. 1,8 bar) kommt.

Das Gas strömt aus der Flasche über einen Druckminderer auf einen Durchflußregler, die Durchflußmenge kann über einen Schwebekörper-Flußmesser abgelesen werden. Nach dem Durchströmen der Monitorkammer durchläuft es eine 'Blubberflasche' und gelangt über einen Auslaß ins Freie. Aufgabe der Blubberflasche ist eine grobe Kontrolle der Funktion des Gaskreislaufes, sowie der Luftabschluß des Gasausganges. Während der Messungen wurden Durchflußmengen von ca. $10 \text{ cm}^3/\text{min}$ eingestellt.

Die Hochspannungsversorgung der Monitorkammer erfolgte über ein Netzteil (0-6 kV, maximal $500\mu\text{A}$), wobei der Maximalstrom auf $60\mu\text{A}$ eingestellt wurde.

Elektronik zur Auslese der Monitorkammer

Abbildung 4.4 zeigt schematisch die verwendete Schaltung, sie ist eine Weiterentwicklung der in [LIP92] dargestellten Schaltung. Sie wurde, abgesehen vom Vorverstärker, aus CAMAC-Modulen aufgebaut und mit einem Rechner verbunden. Das Programm für die Auslese wurde in der Programmiersprache C erstellt.

Das Kammersignal durchläuft zunächst den Vorverstärker (Abbildung 4.5), der einerseits eine Impedanzanpassung vornimmt, andererseits den Einfluß von

eingekoppelten Störungen auf dem Weg zum Abschwächer mindert. Das verstärkte Signal wird durch ein passives T-Stück aufgespalten.

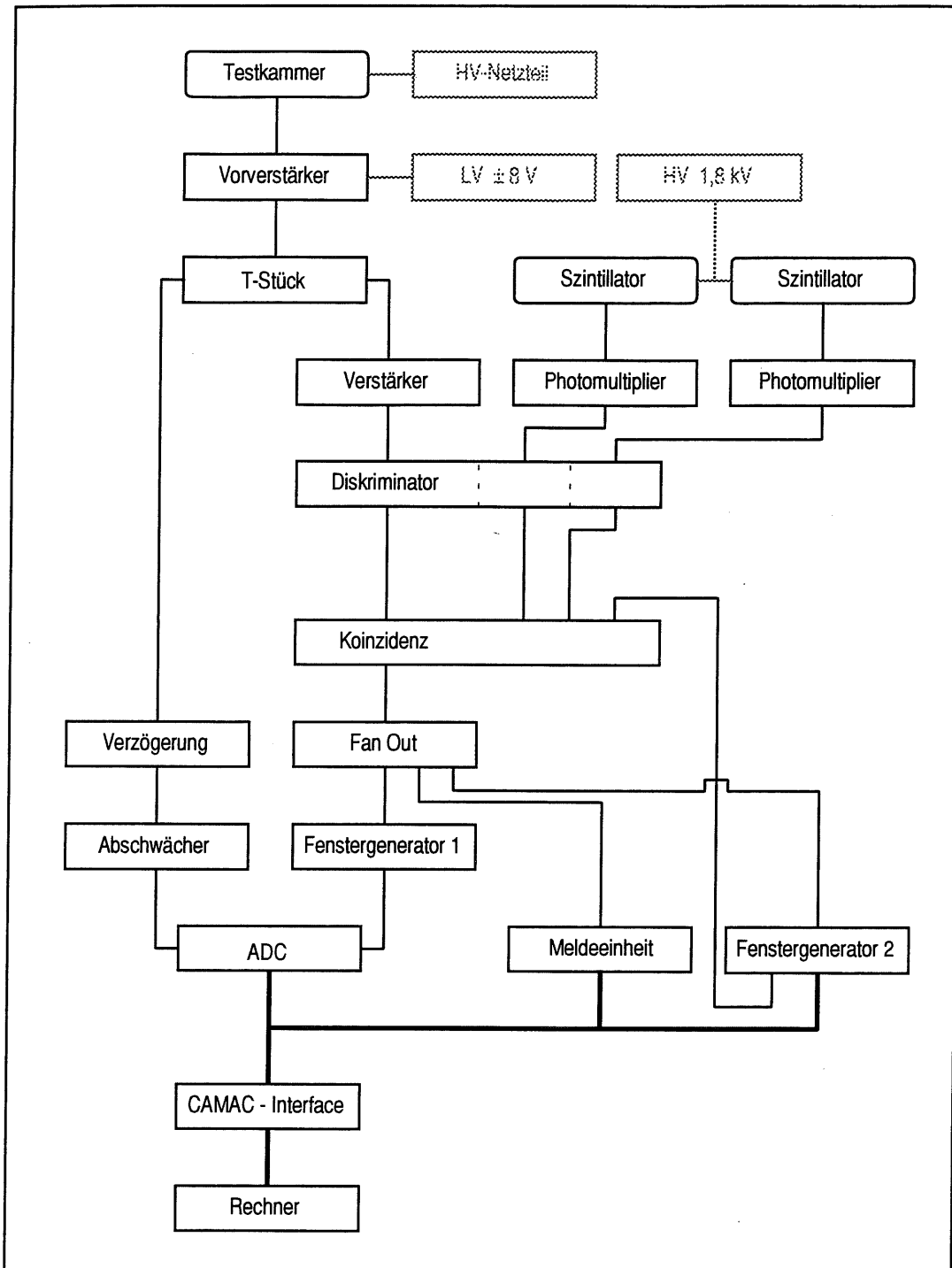


Abbildung 4.4 : Die Ausleseelektronik

Der linke Zweig (in Abbildung 4.4) führt das Signal der Monitorkammer auf den Eingang des Analog-Digital Wandlers (ADC). Dieser Zweig besteht aus einer Verzögerungsleitung, zum Ausgleich der Signallaufzeit im anderen Zweig, und einem Abschwächer zur Anpassung an den Spannungsbereich des ADC. Der

verwendete ADC ist ladungsempfindlich, das heißt, er integriert den am Eingang geflossenen Strom, während ein Steuersignal (gate) anliegt. Die Auflösung des ADC beträgt 10 bit, über einen Bereich von 0-256 pC.

Der rechte Zweig dient der Erzeugung des Steuersignals für den ADC. Er wird über einen integrierenden Verstärker auf einen Diskriminator geführt. Aufgabe des Verstärkers ist eine Absenkung der Diskriminatorschwelle und eine Rauschunterdrückung durch Integration des Signals ($\tau = 10$ ns). Die Einstellung der Schwelle erfolgte so niedrig, wie es das Rauschen der Schaltung zuließ.

Das Diskriminatorsignal wird auf die Koinzidenzstufe geführt, die die Datennahmefähigkeit des Rechners und des ADC sowie (schaltbar) die Koinzidenz mit den Szintillatortpulsen feststellt.

Bei vorliegender Koinzidenz wird über den Fenstergenerator 2, der hier lediglich als bistabiler 'Schalter' dient, das Akzeptieren eines weiteren Pulses verhindert ('Veto'). Die Koinzidenz wird über die Meldeeinheit dem Rechner mitgeteilt und das Fenstersignal (250 ns) an den Gateeingang des ADC gelegt.

Nachdem das Wandlungsergebnis des ADC vom Rechner ausgelesen und durch vier dividiert gespeichert wurde, meldet der Rechner seine erneute Bereitschaft durch Zurücksetzen des Fenstergenerators 2.

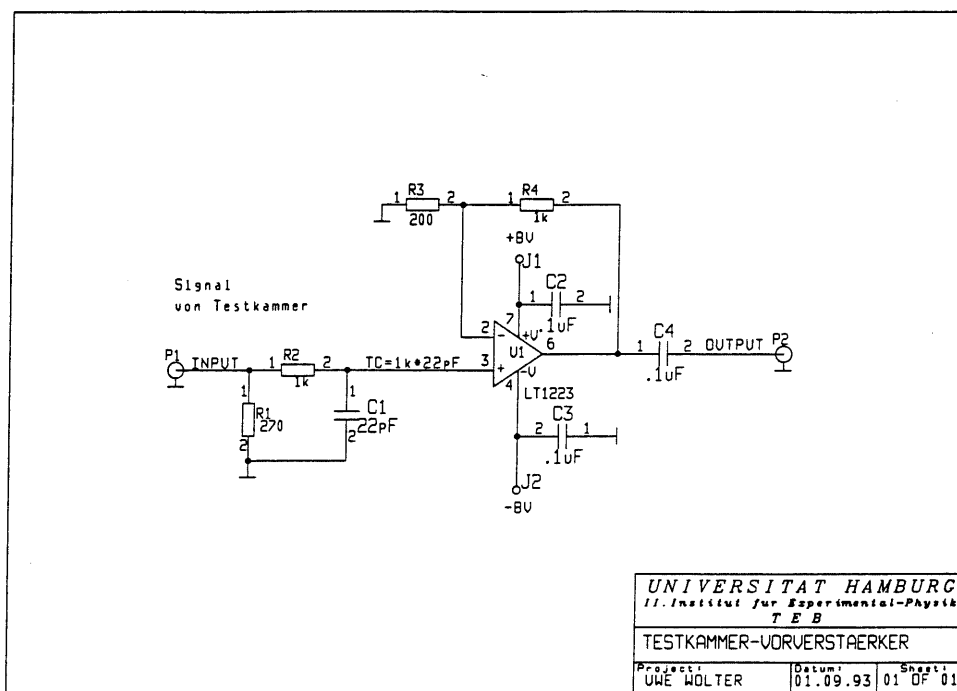


Abbildung 4.5 : Vorverstärker der Ausleselektronik

Eichung

Die Ladungseichung sowie die Prüfung der Linearität der Monitorkammer-Auslese erfolgte mit Hilfe eines Signalgenerators, der anstelle des Kammersignals an den Eingang des Vorverstärkers angeschlossen wurde. Die Parameter des Generators sind so einstellbar, daß seine Ausgangssignale das gleiche Verhalten wie typische Monitorkammer-Pulse haben. Abbildung 4.6 zeigt einen solchen Puls.

Das Integral S dieses Pulses der Amplitude u_0 liefert eine Proportionalitätskonstante k . Sie verknüpft die Amplitude u_{\max} eines Pulses gleicher Form mit der

zugehörigen Ladung q . Bezeichnet R_i den Eingangswiderstand des Vorverstärkers, so gilt

$$q^{(\text{Puls})} = k \cdot u_{\text{max}}^{(\text{Puls})}, \quad k = \frac{1}{u_0} \cdot \frac{S}{R_i}$$

Die Numerische Integration des Pulses in Abbildung 4.6 liefert mit $R_i = 270\Omega$ einen Wert von $k = 0,51 \text{ pC/mV}$.

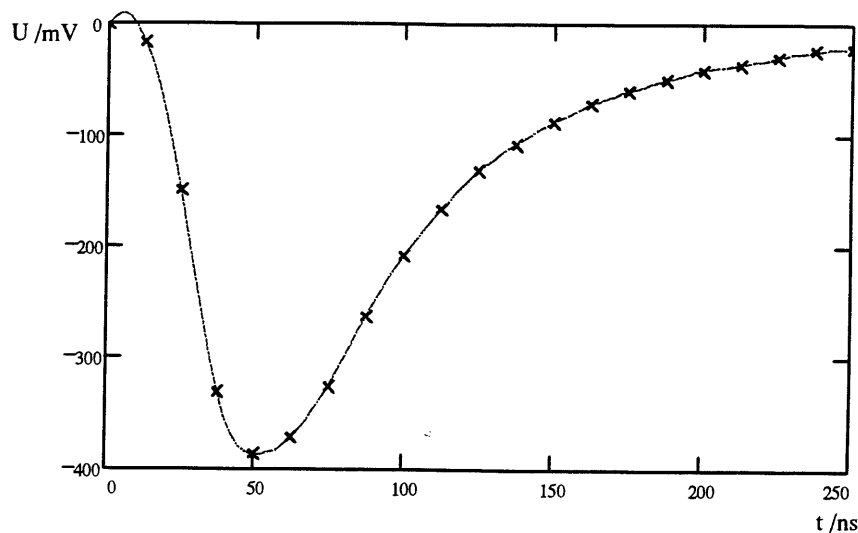


Abbildung 4.6 : Generatorpuls

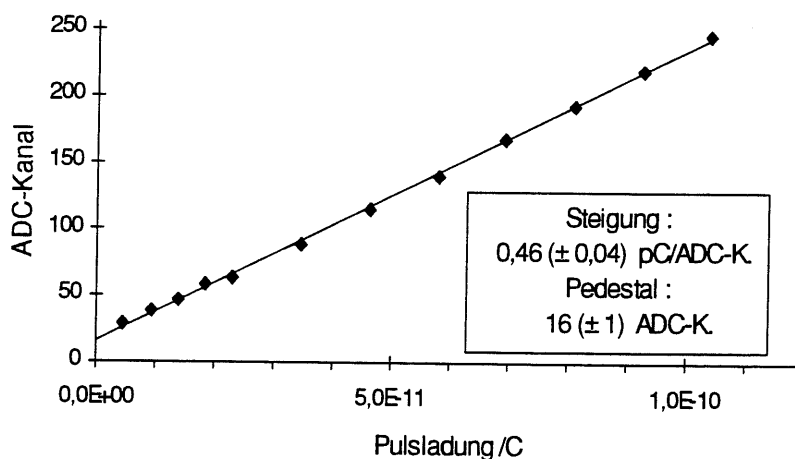


Abbildung 4.7 : Ladungseichung und Linearität

Trägt man das Wandlungsergebnis des ADC für verschiedene Pulsamplituden gegen die so bestimmte Pulsladung auf, so ergibt sich der Verlauf in Abbildung 4.7. In der Abbildung sind Steigung der angepaßten Geraden Δ sowie der Achsenabschnitt A (Pedestal) angegeben.

Die Ladung q eines Pulses ergibt sich aus dem Wandlungsergebnis w des ADC aus

$$q = (w - A) \cdot \Delta$$

Zur 'Totzeit' der Ausleseelektronik

Um das Zeitverhalten der Ausleseelektronik zu untersuchen, wurde ebenfalls der Signalgenerator anstelle der Monitorkammer an den Eingang des Vorverstärkers gelegt. Abbildung 4.8 zeigt die Raten der ausgelesenen Ereignisse als Funktion der Frequenz der angelegten Pulse.

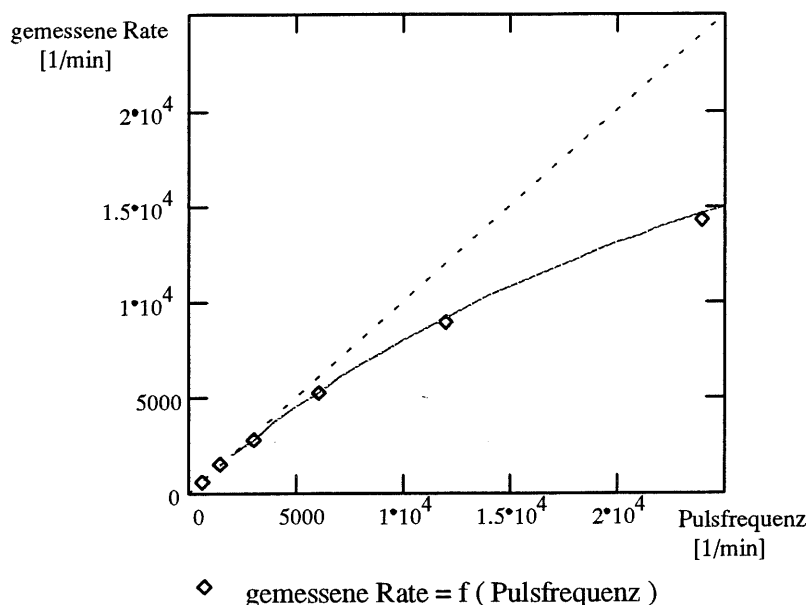


Abbildung 4.8 : Zur Totzeit der Ausleseelektronik

Erwartungsgemäß bleibt mit zunehmender Rate die gemessene Rate hinter der Frequenz der Eingangspulse zurück. Die Messung liefert eine Abschätzung der für die Auslese eines Ereignisses benötigten Zeit: Die reziproke gemessene Rate bei sehr großer Frequenz der Eingangspulse. Sie liegt in der Größenordnung von

$$1 / 2 \cdot 10^4 \text{ min}^{-1} = 3 \text{ ms} .$$

4.3. Die Monitorkammern am H1

Die Monitorkammern zur Überwachung der Gasqualität der Streamerrohrkammern (siehe Kapitel 1.4) sind auf einer Plattform auf der Oberseite des H1 Detektors ('Südgalerie') installiert. Sie sind Bestandteil des Myon-Slow-Control Systems.

Diese Monitorkammern wurden mit ihrer Ausleseelektronik für die Vergleichsmessungen an Gaskreisläufen des Instrumentierten Eisens (Kapitel 5.2) verwendet. Während dieser Messungen wurden beide Monitorkammern am gleichen Hochspannungskanal betrieben, inzwischen verfügt jede der Kammern über einen eigenen Kanal. Dies ermöglicht einen Ausgleich von Unterschieden der einzelnen Monitorkammern (Kapitel 4.1). Die Empfindlichkeit der im Gasausgang betriebenen Monitorkammer läßt sich durch eine höhere Hochspannung

verbessern. Sie liefert bei gleicher Hochspannung aufgrund der schlechteren Gasqualität gegenüber dem Gaseingang schwächere Signale (Kapitel 5.3).

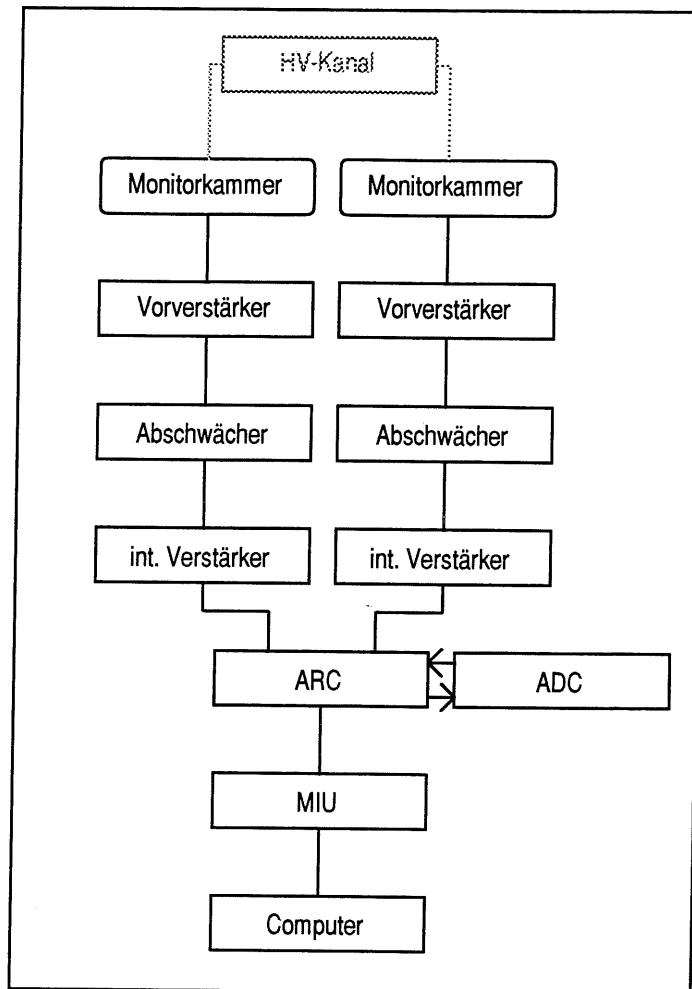


Abbildung 4.9 : Die Monitorkammer-Auslese am H1

Abbildung 4.9 zeigt schematisch den Aufbau. Die verwendeten Vorverstärker sind dem in Kapitel 4.2 beschriebenen ähnlich. Die Abschwächer dienen der Anpassung der Signalamplitude an den Linearitätsbereich der nachfolgenden Verstärker. Ihre Aufgabe ist das Integrieren der Pulse, ihre Integrationskonstante ist mit etwa $1,5\mu\text{s}$ wesentlich größer als die Länge der Streamerpulse gewählt. Das ist nötig, da der verwendete Analog-Digital Wandler (ADC) 'spannungsempfindlich' ist, das heißt, sein Wandlungsergebnis ist proportional zur Amplitude des Pulses am Eingang. Gemessen werden soll hingegen eine der Pulsladung proportionale Größe und damit das Integral über den Spannungsverlauf.

Beim ARC (ADC Readout Converter) und der MIU (Memory Increment Unit) handelt es sich um speziell für diesen Aufbau entwickelte Komponenten. Der ARC schaltet im Sekundentakt den Eingang des ADC zwischen den beiden Verstärkern um und leitet die Wandlungsergebnisse an die MIU weiter. Diese verwaltet für jede Monitorkammer ein Spektrum der Wandlungsergebnisse, diese Spektren werden im Abstand von 15 Minuten vom Myon-Slow-Control Rechner ausgelesen und ausgewertet.

Eine Linearitätsmessung wurde wie die für den Laboraufbau beschrieben durchgeführt. Sie liefert für beide Auslesewege einen linearen Zusammenhang zwischen dem Wandlungsergebnis des ADC und der Pulsladung am Vorverstärker in dem Bereich von etwa 0 bis 150 ADC-Kanälen.

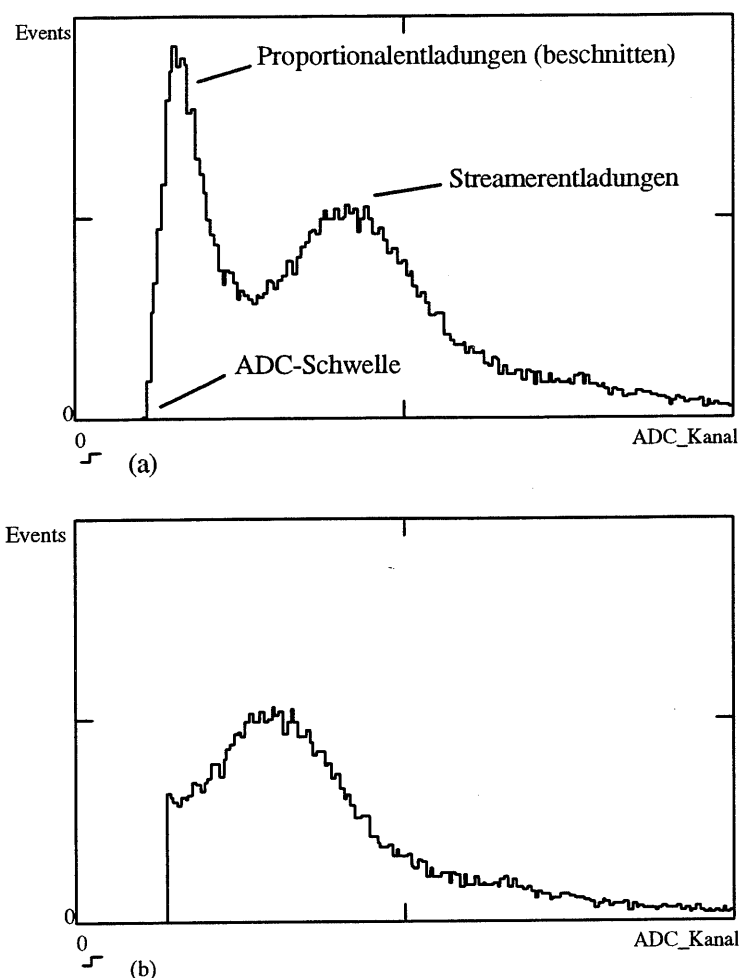


Abbildung 4.10 :
 (a) Typisches Pulshöhenspektrum einer Streamerrohrkammer
 (b) Pulshöhenspektrum mit gleichem Mittelwert

4.4. Verfahren zur Spektrenauswertung

Im Folgenden werden drei Verfahren zur Auswertung von Pulshöhenspektren der Streamerrohrkammern dargestellt. Die Spektren weisen über einen weiten Hochspannungsbereich zwei Maxima auf, da es sowohl zu Proportional-, als auch zu Streamerentladungen kommt (Kapitel 3.1). Abbildung 4.10 (a) zeigt ein typisches Spektrum.

Die Eignung der Verfahren für die Auswertung der Labormessungen, sowie für die Auswertung der Monitorkammer-Spektren am H1 Detektor wird betrachtet.

Unter einem Pulshöhenspektrum N sei ein Feld von Zahlen verstanden, in dem jeder Eintrag $N(q_i)$ die Häufigkeit angibt, mit der die Pulsladung q_i aufgetreten ist.

(1) Mittelwert der Spektrumseinträge

Für ein solches Spektrum ergibt sich der (gewichtete) Mittelwert aus

$$N_{\text{MW}} = \frac{\sum_i (N(q_i) \cdot q_i)}{\sum_i N(q_i)}$$

Das Verfahren liefert für Spektren mit deutlich unterschiedlichem Verlauf (z.B. die der Abbildung 5.2 in Kapitel 5.1) nur zum Teil Informationen über die Streamerentladungen, hier ist das Verfahren (3) geeigneter. Um geringe Unterschiede ähnlich verlaufender Spektren festzustellen, ist das Verfahren hingegen wegen seiner guten Stabilität geeignet. Daher wird das Verfahren für die Auswertung der Monitorkammer-Spektren in der Überwachung des instrumentierten Eisens verwendet.

Es sind Veränderungen der Form eines Spektrums denkbar, bei denen sich der Mittelwert nicht ändert. Daher ist für die Überwachung ein weiteres Verfahren wünschenswert, das die Form des Spektrums zusätzlich auswertet.

Abbildung 4.10 skizziert einen solchen Fall, in dem von (a) nach (b) das Spektrum nach links verschoben wird, etwa durch eine überlagerte Gleichspannung der gemessenen Pulse. Gleichzeitig bleibt die Ausleseschwelle des ADC konstant. Die Spektren (a) und (b) haben den gleichen Mittelwert.

(2) Mittlere Abweichung der Spektrumseinträge vom Mittelwert

Ein Maß für die 'Ausgedehnthheit' des Spektrums liefert

$$N_{\text{DEV}} = \frac{\sum_i (N(q_i) \cdot |q_i - N_{\text{MW}}|)}{\sum_i N(q_i)}$$

Die Einträge des Spektrums werden hier mit dem Betrag ihrer Abweichung vom Mittelwert des Spektrums gewichtet. Die Verwendung der linearen Abweichung ist hier nicht zwingend. Sie hat sich jedoch im Vergleich zur quadratischen Abweichung als günstig erwiesen, da sie die Form des Spektrums in der Nähe des Mittelwertes stärker berücksichtigt.

Das Verfahren ist ebenfalls stabil, so daß es für Überwachung normalerweise gleichbleibender Spektren geeignet ist.

(3) Häufigste Streamerladung

Um die häufigsten Einträge in das Spektrum durch Streamerentladungen zu bestimmen, wird die Lage des 'Streamerpeaks' (Abbildung 4.10) festgestellt. Da das in [NOR92] dazu verwendete Verfahren die Lage des Maximums nicht immer zuverlässig bestimmt, wurde das folgende Verfahren entwickelt. Es ist an die vorliegende typische Spektrenform angepaßt und liefert für Spektren des Typs in Abbildung 4.10 (a) Ergebnisse in Übereinstimmung mit der visuellen Beurteilung. Die Abbildung 4.11 zeigt die Schritte des Verfahrens.

Zunächst wird an die rechte Flanke des Proportionalpeaks eine Exponentialfunktion $a \cdot \exp(-b \cdot (x - x_0))$ angepaßt (a). Die Anpassung erfolgt einparametrig, indem die Parameter a und x_0 als Höhe und Lage des Proportionalpeaks gewählt werden. Die so bestimmte Exponentialfunktion wird vom Spektrum abgezogen. Diese 'Aufbereitung' des Spektrums ist nötig, damit im nächsten Schritt die Lage des Streamerpeaks zuverlässig grob lokalisiert werden kann.

Dazu wird das absolute Maximum des aufbereiteten Spektrums (b) rechts von einer fest gewählten Schwelle gesucht. Diese Schwelle wird in das typische lokale Minimum zwischen Proportional- und Streamerpeak gesetzt. Schließlich wird in der Umgebung dieses Maximums eine Parabel (c) an den Streamerpeak angepaßt, die Lage des Scheitelpunktes liefert die Lage des Streamerpeaks N_{PEAK} .

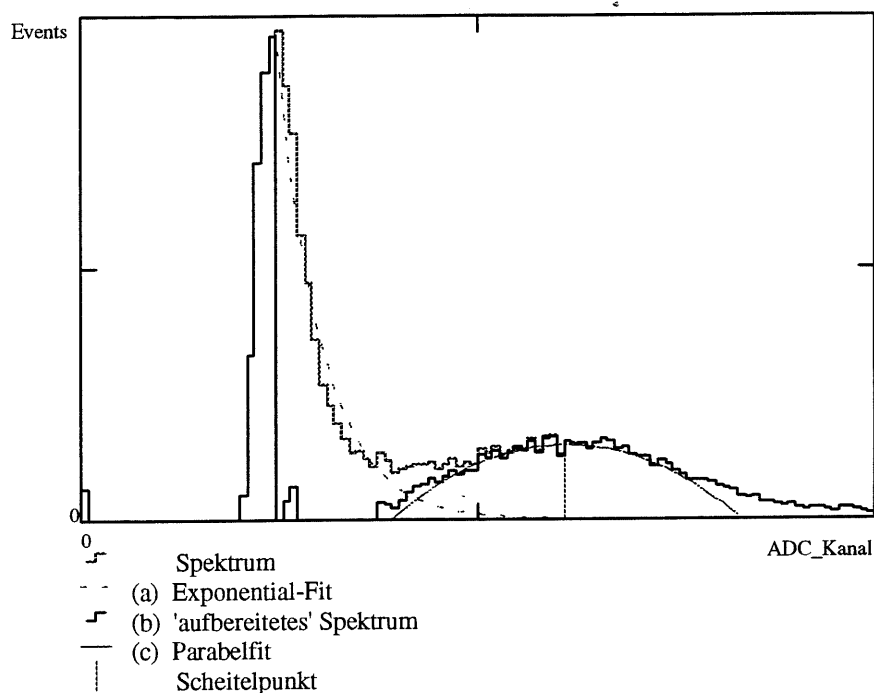


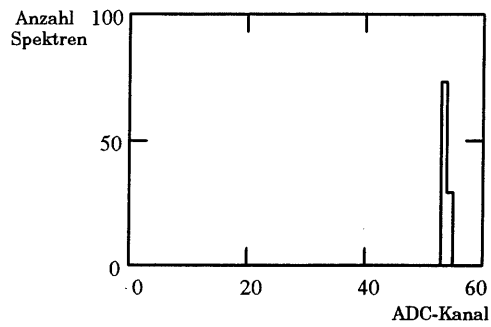
Abbildung 4.11 : Verfahren zur Bestimmung der Lage des Streamerpeaks

Zur Stabilität der Verfahren

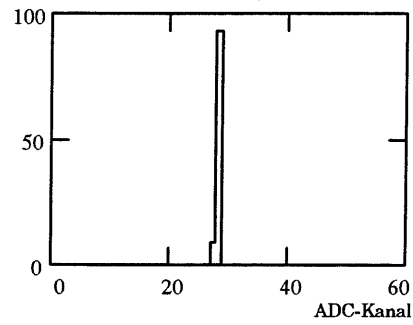
Um die Stabilität der dargestellten Verfahren gegenüber statistischen Schwankungen der ausgewerteten Spektren zu vergleichen, wurden zahlreiche Spektren mit der Häufigkeitsverteilung eines Musterspektrums 'gewürfelt'. Die für diese Spektren durch die Verfahren (1)-(3) erhaltenen Ergebnisse wurden in Histogramme eingetragen.

Abbildung 4.12 zeigt solche Histogramme für eine Menge von 100 Spektren, die nach einem Musterspektrum mit 20.000 Einträgen gewürfelt wurden. Die Anzahl der Einträge ist damit etwa so groß wie bei den Pulshöhenspektren der Monitor-kammern am H1.

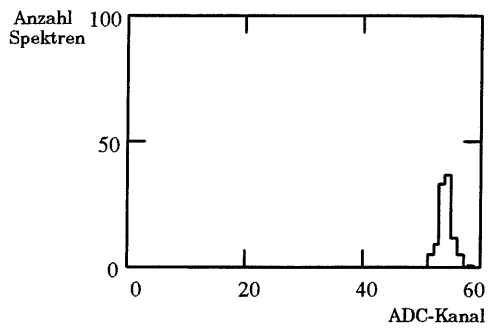
Die Streuung der Ergebnisse ist für das Verfahren (3) größer als für die Verfahren (1) und (2), das ist zu erwarten, da die Anzahl der für das Ergebnis genutzten Spektrumseinträge kleiner ist.



┌ (1) Mittelwert $\sigma_{\text{rel.}} = 0,8\%$



┌ (2) mittlere Abweichung $\sigma_{\text{rel.}} = 1,0\%$



┌ (3) häufigste Streamerladung $\sigma_{\text{rel.}} = 2,2\%$

*Abbildung 4.12 : Zur Stabilität der Verfahren (1)-(3)
zur Spektrenauswertung
(angegeben ist die relative Standardabweichung
der Verteilungen)*

5. Ergebnisse

5.1. Verhalten einer Monitorkammer bei kosmischer Strahlung und β -Bestrahlung

Es wurden die Streamerladungen, sowie die Ereignisraten einer Monitorkammer in Abhängigkeit von der angelegten Hochspannung gemessen. Die Messung erfolgte einerseits bei Bestrahlung durch die β -Quelle der Monitorkammer, andererseits bei Durchgang kosmischer Strahlung durch die Monitorkammer (vergleiche Kapitel 4.1).

Die bei der Messung mit der β -Quelle vorhandene Rate durch kosmische Strahlung, Radioaktivität der Konstruktionsmaterialien etc., wurde durch Entfernen der Quelle bestimmt, sie beträgt weniger als 5% der durch die Quelle erzeugten Rate. Abbildung 5.1 zeigt ein mit der β -Quelle aufgenommenes Spektrum und das zugehörige Spektrum bei entfernter Quelle.

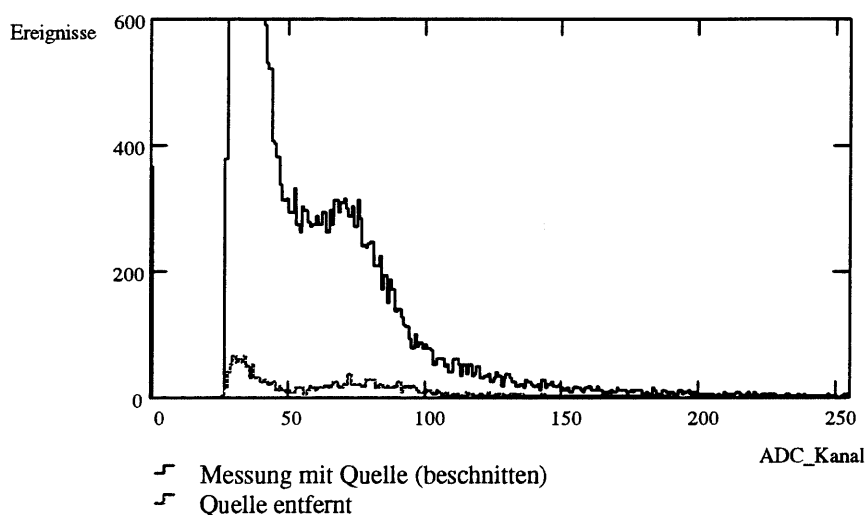


Abbildung 5.1 : Untergrundspektrum bei Messung mit der β -Quelle

Die Abbildung 5.2 zeigt einige der aufgenommenen Spektren. Wegen der deutlich verschiedenen qualitativen Verläufe der Spektren wurde zur Auswertung nicht der Mittelwert der Einträge des Spektrums, sondern die häufigste Streamerladung (Streamerpeak, Kapitel 4.4) herangezogen.

Die in Abbildung 5.3 dargestellten Messungen mit kosmischer Strahlung dauerten jeweils etwa 20 h, sie erstreckten sich insgesamt über eine Woche. Die protokollierten Luftdrucke schwankten in diesem Zeitraum um maximal ± 10 hPa, die Temperaturen um ± 2 °C ; die dargestellten Meßwerte sind also, gemäß den

Abhängigkeiten der Streamerladung von Druck und Temperatur aus Kapitel 3.1, mit einem Fehler von einigen Prozent behaftet.

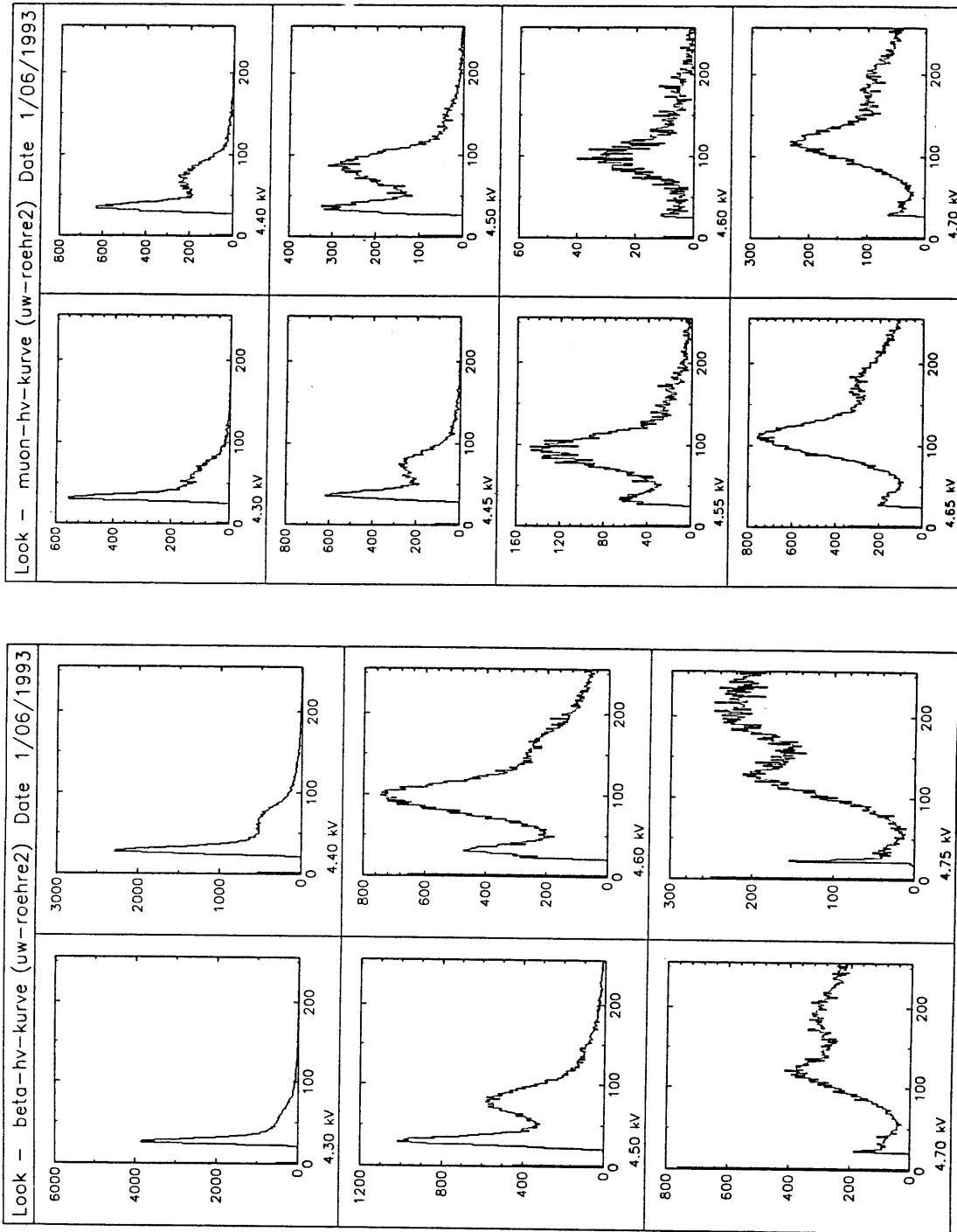


Abbildung 5.2 : Streamerrohrspektren bei Bestrahlung mit Elektronen (links) oder kosmischer Strahlung (rechts)

Die in Abbildung 5.4 dargestellten Ratenmessungen hingegen wurden mit geringeren Ereignisanzahlen pro Spektrum aufgenommen, sie erfolgten innerhalb weniger Stunden. Der Luftdruck schwankte in diesem Zeitraum um weniger als 2 hPa, die Temperatur war auf 1°C konstant.

Im Rahmen der durchgeführten Untersuchungen zeigten die Streamerrohrkammern bei Bestrahlung durch die β -Quelle kein anderes Verhalten als bei der Bestrahlung durch kosmische Myonen. Das entspricht der Erwartung, da das Ionisationsvermögen der beiden Teilchensorten bei den betrachteten Energien ähnlich ist (Kapitel 3.2).

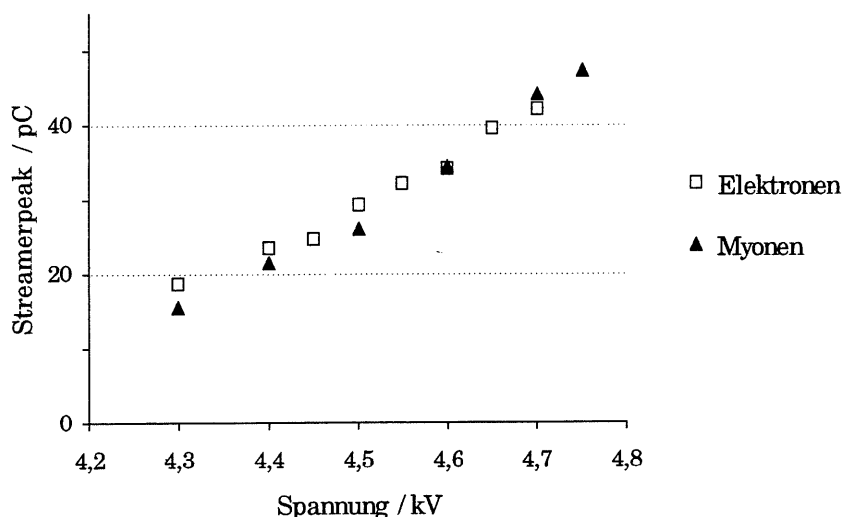


Abbildung 5.3 : Streamerladung in Abhängigkeit von der Hochspannung

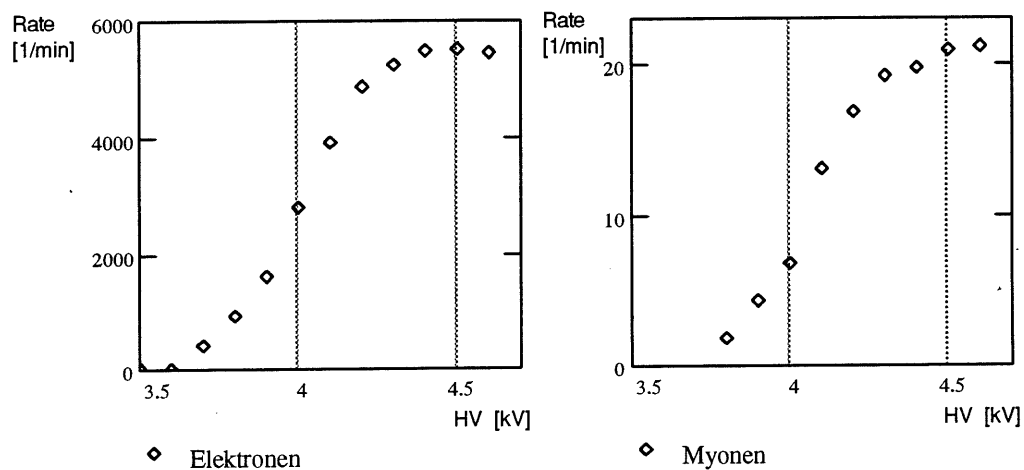


Abbildung 5.4 : Raten in Abhängigkeit von der Hochspannung

5.2. Vergleich von Gaskreisläufen des Instrumentierten Eisens

Die im Folgenden beschriebenen Messungen wurden durchgeführt, um Unterschiede der Gasqualität in den verschiedenen Gaskreisläufen des Instrumentierten Eisens zu untersuchen.

Für die Messungen wurden die Monitorkammern des Myon-Slow-Control Systems verwendet (Kapitel 4.3). Dadurch war der Gaseingang des Clusters C des Gassystems (Kapitel 1.3), sowie die Ausgänge der zugehörigen Kreisläufe erreichbar. Die Einstellung der Hochspannung der Monitorkammern erfolgte durch die Regelung des Myon-Slow-Control Systems.

Das Gas hat beim Erreichen der Monitorkammern die Umgebungstemperatur der Kammern, eventuelle Temperaturunterschiede in den Kreisläufen waren bereits am Gasverteiler nicht mehr meßbar.

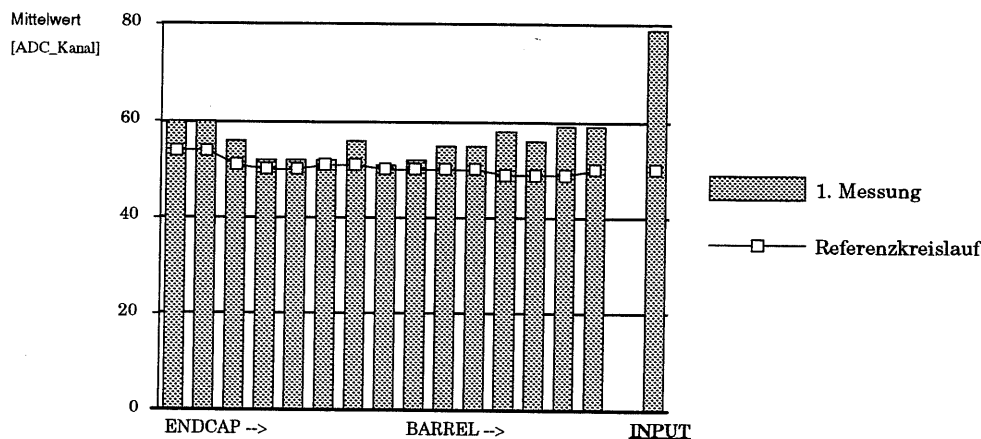


Abbildung 5.5 : Vergleich einiger Gaskreisläufe des Instrumentierten Eisens

Die Messungen wurden während einer Wartungsperiode von HERA durchgeführt. Durch die am H1 Detektor durchgeführten Arbeiten kam es zu gelegentlichen Schwankungen der Gasqualität des gesamten Gassystems, oder zu Fehlfunktionen der Hochspannungsregelung. Um diese Störungen zu erfassen, wurde eine der beiden Monitorkammern über den gesamten Meßzeitraum am gleichen Gasausgang betrieben (die daraus erhaltenen Werte sind hier als Referenzmessung bezeichnet).

Die zweite Monitorkammer wurde nacheinander mit verschiedenen Gaskreisläufen verbunden. Die Stabilisierung des mit der Kammer gemessenen Spektrums dauerte nach dem Wechsel des Gaskreislaufes in der Regel einige Stunden, so daß nicht mehr als zwei Messungen pro Tag möglich waren.

Die Abbildung 5.6 zeigt einige der aufgenommenen Monitorkammer-Spektren. Der Unterschied zwischen dem im Gaseingang gemessenen Spektrum und den in den Gasausgängen gemessenen ist erkennbar. Die Abbildung 5.5 zeigt die Mittelwerte der ausgewerteten Monitorkammer-Spektren, Messungen mit stark abweichender

Referenzmessung wurden nicht verwendet. Die Werte repräsentieren die Ausgänge verschiedener Gaskreisläufe, unterteilt nach ihrer Lage im Endcap oder im Barrel. Der mit 'Input' bezeichnete Wert repräsentiert den Gaseingang. Die Standardabweichung der dargestellten Messungen in den Gasausgängen beträgt 3%. Die maximale Abweichung eines Gasausgangs vom Mittelwert der übrigen beträgt 8%.

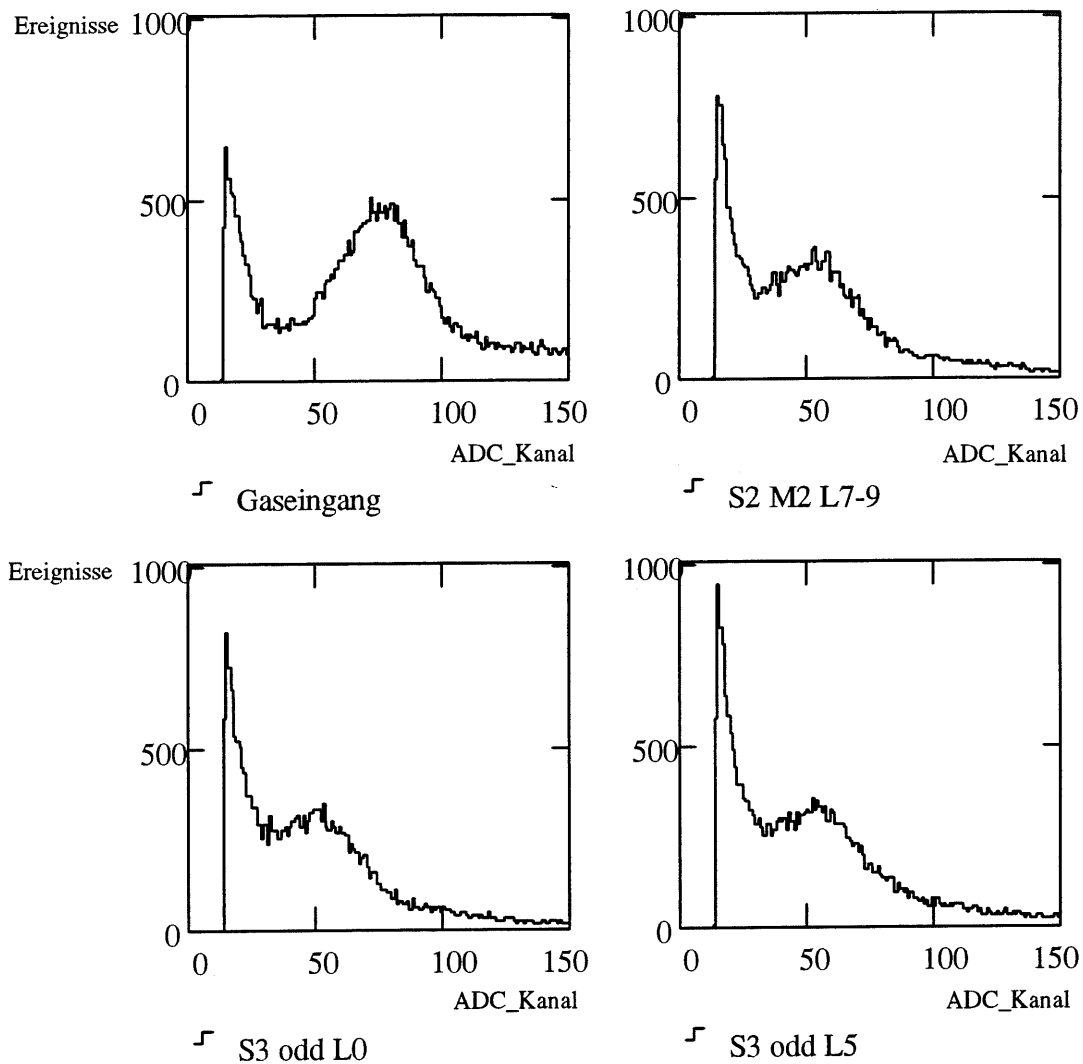


Abbildung 5.6 : Einige Monitorkammerspektren aus verschiedenen Gaskreisläufen des Instrumentierten Eisens (Die Abkürzungen bezeichnen die Subdetektornummer, den Teil des Barrels oder Endcaps sowie die Lage in dem der jeweilige Kreislauf liegt. Numerierung siehe Kapitel 1.3)

In einigen Gasausgängen wurde nach einigen Tagen ein zweites Mal gemessen, um die Reproduzierbarkeit der Werte einzelner Gaskreisläufe abzuschätzen (Abbildung 5.7). Die maximale Abweichung zweier Messungen am gleichen Kreislauf betrug 12%, typisch waren jedoch geringere Werte.

Die durchgeführten Messungen zeigen, daß der Unterschied der Gasqualität zwischen dem Gasein- und Ausgang der Gaskreisläufe des Instrumentierten Eisens in allen vermessenen Kreisläufen etwa gleich groß ist.

Um die Entwicklung der Gasqualität vom Gaseingang zu den Ausgängen der Kreisläufe zu untersuchen, wären Messungen an Verbindungen innerhalb der Kreisläufe nötig. Diese Verbindungen waren mit dem gegebenen Aufbau nicht zugänglich.

Die Veränderung der Gaszusammensetzung zwischen dem Ein- und Ausgang der Kreisläufe könnte sowohl durch eine Verunreinigung des Gases, als auch durch unterschiedliche Diffusionsverluste der verschiedenen Komponenten verursacht sein. Hinweise auf den konkreten Mechanismus liegen nicht vor.

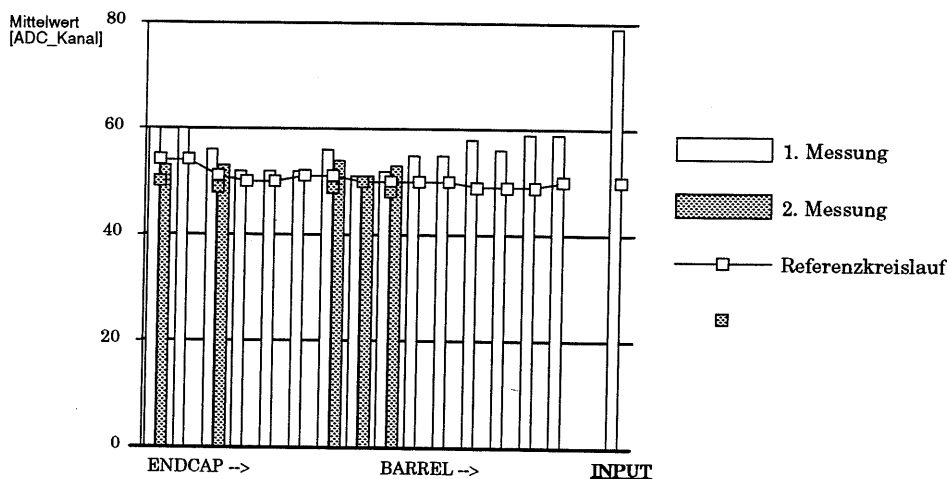


Abbildung 5.7 : Zur Reproduzierbarkeit der Vergleichsmessungen

5.3. Analyse von Daten der Streamerrohrkammer-Überwachung

Im Folgenden wird eine Analyse von Daten der Streamerrohrkammer-Überwachung am Instrumentierten Eisen beschrieben. Sie liefert Informationen über die Stabilität des Verhaltens der Streamerrohrkammern am H1 Detektor. Insbesondere wird die Funktion der Hochspannungsregelung (Kapitel 1.4) betrachtet. Dabei wird ein Korrekturwert für die Regelungskonstante der Hochspannungsregelung bestimmt.

Ausgewertet wurden die Daten, die der Myon-Slow-Control Rechner innerhalb von etwa vier Wochen aufgezeichnet hatte. Dieser Zeitraum wurde in drei zehntägige Abschnitte (I-III) unterteilt.

Abschnitt	Zeitraum
I	(17.7. - 26.7.93)
II	(1.8. - 10.8.93)
III	(11.8. - 20.8.93)

Abbildung 5.8 zeigt die Meßwerte des Abschnitts I in zeitlicher Folge. mean-in, mean-out bezeichnet den Mittelwert des Pulshöhenspektrums der Monitorkammer im Gasein- bzw. ausgang; p bezeichnet den Luftdruck, T (oben/unten) die Temperatur auf der Höhe der Ober- bzw. Unterseite des H1 Detektors. Die

senkrechten Linien in den Graphen sind durch Fehlfunktionen der Meßapparatur verursacht, diese Werte wurden nicht für die Analyse verwendet.

Die im Gasausgang gemessenen Werte sind einerseits wegen der schlechteren Gasqualität kleiner als die Werte des Gaseingangs (Kapitel 5.2). Hinzu kommt, daß die im Gasausgang betriebene Monitorkammer unter gleichen Bedingungen schwächere Signale lieferte als die Kammer im Gaseingang (Kapitel 4.1).

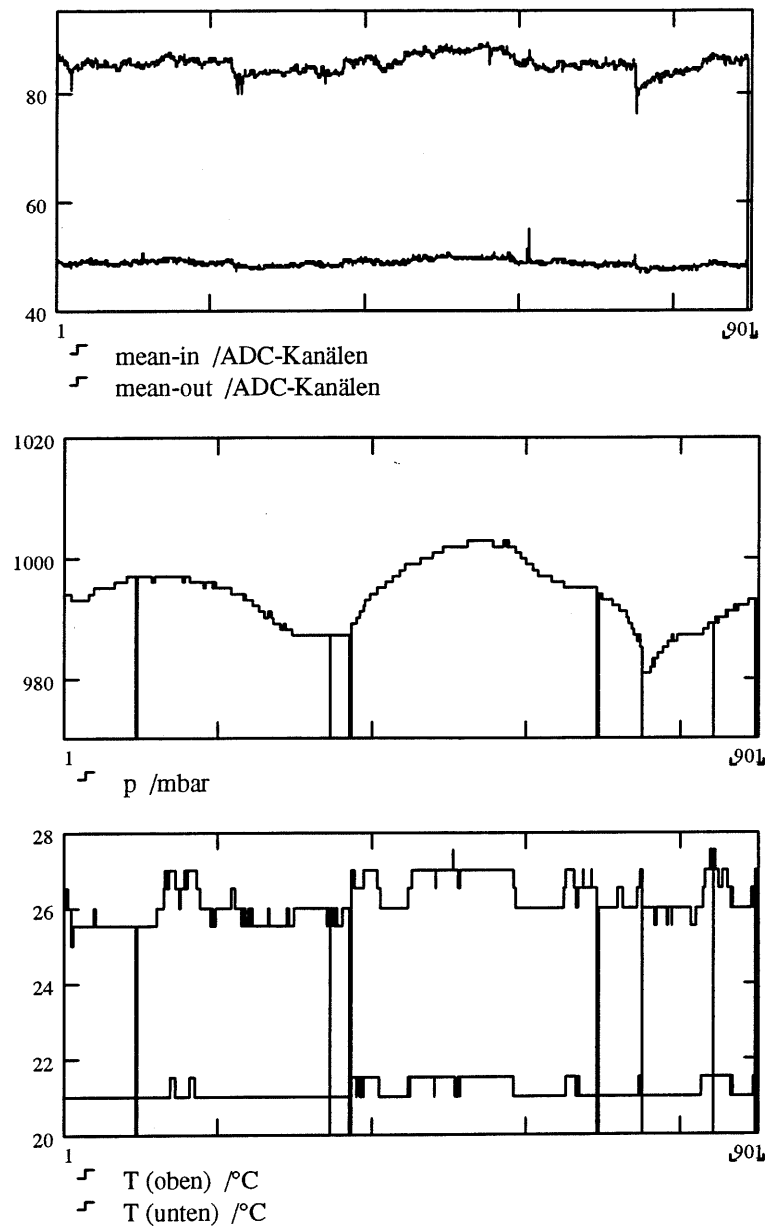


Abbildung 5.8 : Meßwerte der Streamerrohrkammer-Überwachung
(die Messungen sind fortlaufend durchnummeriert)

Korrektur der Hochspannungs-Regelungskonstanten

Im Folgenden wird ein Korrekturwert ΔC der Hochspannungs-Regelungskonstanten $C^{(\text{alt})}$ bestimmt :

$$C^{(\text{neu})} = C^{(\text{alt})} + \Delta C$$

$C^{(\text{alt})}$ bezeichnet den während der Messungen eingestellten Wert von 3,0 V/hPa. Der korrigierte Wert $C^{(\text{neu})}$ soll eine möglichst optimale Stabilisierung der Streamerentladungen gegenüber Schwankungen des Luftdrucks erreichen.

Die weiteren Abbildungen dieses Kapitels zeigen nur die Daten des Abschnitts I, die Ergebnisse aller Abschnitte sind in der untenstehenden Tabelle zusammengefaßt.

Zunächst soll die mittlere Temperaturabhängigkeit der Spektrumsmittelwerte im Gaseingang, kurz m_i genannt, bestimmt werden. Dabei wird nur die Temperatur $T = T(\text{oben})$ verwendet, da sie in unmittelbarer Nähe der Monitorkammer gemessen wurde.

Die Bestimmung und Korrektur der Druck- und Temperaturabhängigkeit der m_i erfolgt getrennt nacheinander, unter der Annahme, daß sie nicht korreliert sind.

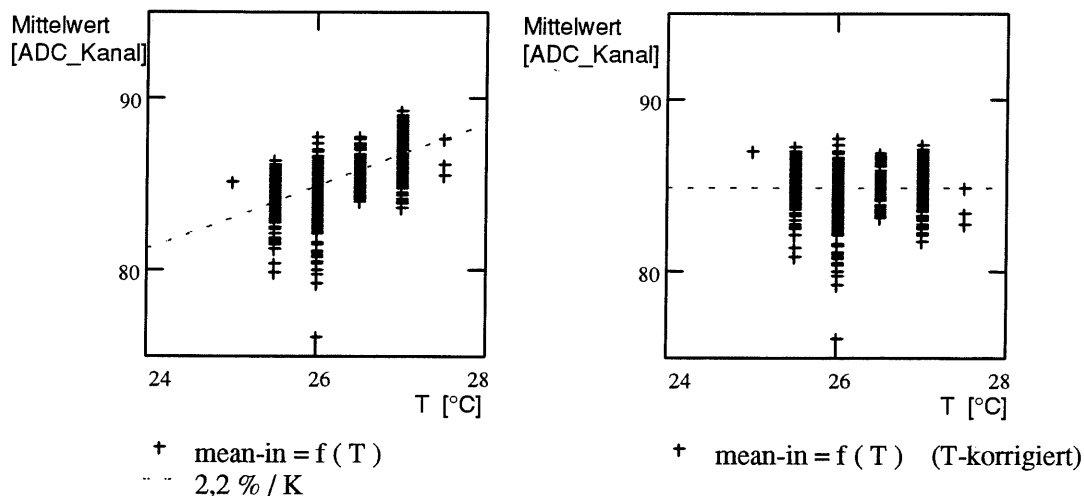


Abbildung 5.9 : Temperaturabhängigkeit der Streamerladung
unkorrigiert (links) / korrigiert (rechts)

Die m_i werden als Funktion von T aufgetragen und durch eine Ausgleichsgerade approximiert (Abb. 5.9 links). Die 'relative Steigung' der Geraden, die Steigung S_T geteilt durch den Mittelwert der m_i beträgt

$$k_T = \frac{S_T}{\bar{m}_i} = 2,2 \% / K$$

Sie entspricht dem in Kapitel 3.1 angegebenen Parameter k_T (4 %/K) und liegt in der gleichen Größenordnung.

Die Temperaturabhängigkeit wird nun korrigiert, indem von den m_i ein aus S_T bestimmter Wert abgezogen wird

$$m^{(T\text{-korrig.})} = m - S_T \cdot (T - \bar{T})$$

Die m_i werden also auf die mittlere Temperatur \bar{T} 'zurückgerechnet'. Die so korrigierten Werte sind in Abbildung 5.9 (rechts) über T aufgetragen.

Die Abbildung 5.10 zeigt links diese temperaturkorrigierten m_i in Abhängigkeit vom Luftdruck aufgetragen. Die relative Steigung der Ausgleichsgeraden beträgt

$$k_p^{(\text{reg.})} = \frac{S_p}{\bar{m}_i} = (0,19 \pm 0,04) \%/\text{hPa}$$

Sie ist ein Maß für die trotz der Hochspannungsregelung verbliebene Druckabhängigkeit der m_i . Das so bestimmte $k_p^{(\text{reg.})}$ ist positiv, es beträgt etwa 1/6 des in Kapitel 3.1 angegebenen Wertes von k_p (-1,2 %/hPa).

Die Hochspannungsregelung führte also mit der Regelkonstanten $C^{(\text{alt})}$ zu einer geringen Überkompensation der Druckabhängigkeit der m_i . Das haben auch die Untersuchungen in [LIP92] und [BÜN92] gezeigt.

Die Druckabhängigkeit der $m_i^{(\text{T-korr.})}$ kann nun mit Hilfe der Steigung S_p korrigiert werden

$$m^{(\text{T\&p-korr.})} = m^{(\text{T-korr.})} - S_p \cdot (p - \bar{p})$$

Die so erhaltenen temperatur- und druckkorrigierten Werte sind in Abbildung 5.10 (rechts) über p aufgetragen. Sie weisen im Mittel keine Druckabhängigkeit auf, sind also die Werte, die eine optimale Hochspannungsregelung in Abhängigkeit vom Luftdruck bei konstanter Temperatur geliefert hätte.

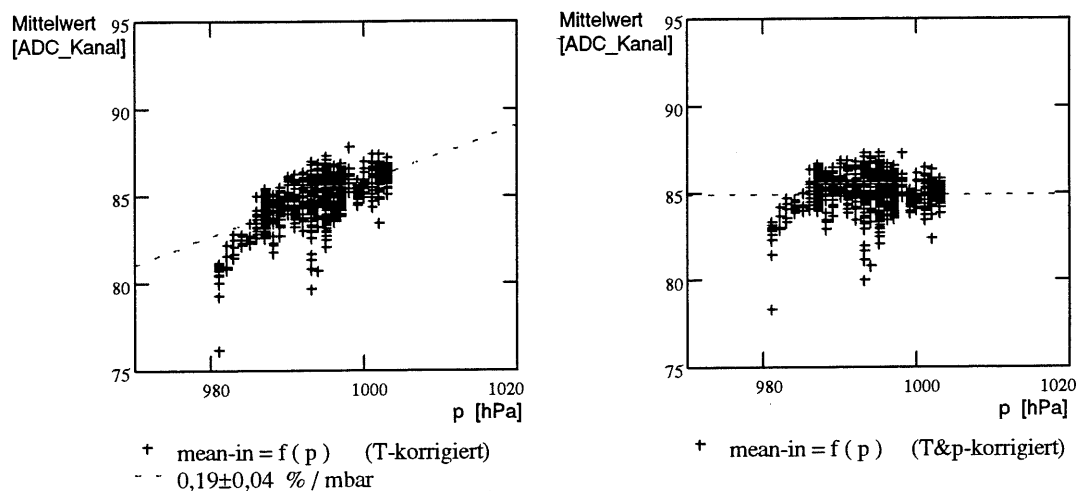


Abbildung 5.10 : Druckabhängigkeit der temperaturkorrigierten Streamerladung unkorrigiert (links) / korrigiert (rechts)

Die Regelkonstante $C^{(\text{neu})}$ dieser optimalen Regelung unterscheidet sich um

$$\Delta C = -\frac{k_p^{(\text{reg.})}}{k_{\text{HV}}}$$

von $C^{(\text{alt})}$. Denn ΔC soll die bei der Regelung mit $C^{(\text{alt})}$ verbliebene Druckabhängigkeit der m_i kompensieren :

$$\delta m = \delta p \cdot (k_p^{(\text{reg.})} + k_{\text{HV}} \cdot \Delta C) \cdot m = 0$$

Die erhaltenen Werte für ΔC sind in der folgenden Tabelle zusammengefaßt. Der angegebene Fehler von ΔC ergibt sich aus dem statistischen Fehler der Geradensteigung $k_p^{(\text{reg.})}$, der Fehlerangabe für k_{HV} ($0,436 \pm 0,001 \%/\text{V}$) aus [NOR92], sowie der Annahme, daß die Genauigkeit der Druckmessung ± 1 hPa beträgt [NOR92].

Die Ergebnisse der drei ausgewerteten Zeiträume:

Abschnitt	k_T [%/K]	$k_p^{(reg.)}$ [%/hPa]	ΔC [V/hPa]
I	2,2	$0,19 \pm 0,04$	$-0,43 \pm 0,09$
II	2,4	$0,09 \pm 0,04$	$-0,20 \pm 0,09$
III	4,5	$0,16 \pm 0,04$	$-0,36 \pm 0,08$

Mittelwert : $-0,33 \pm 0,08$ V/hPa

Die Ergebnisse der Abschnitte I-III weichen zum Teil über die Fehlergrenzen voneinander ab. Das ist vermutlich durch Schwankungen der Gaszusammensetzung verursacht.

Der hier bestimmte optimale Wert für die Regelungskonstante beträgt

$$C^{(neu)} = 3,0 \text{ V} - (0,33 \pm 0,08) \text{ V/hPa} = 2,67 \pm 0,08 \text{ V/hPa}$$

Dieser Wert ist verträglich mit dem in [NOR92] durch Labormessungen bestimmten Wert von $C^{(NOR92)} = 2,72 \pm 0,04$ V/hPa.

Inzwischen wurde die Regelungskonstante auf $C = 2,75$ V/hPa korrigiert, was ein weitgehend optimales Verhalten der Hochspannungsregelung gewährleisten sollte.

Stabilität des Verhaltens der Monitorkammer

Die Abbildung 5.11 zeigt die Häufigkeitsverteilung der im Abschnitt I gemessenen Druckwerte. Die Standardabweichung dieser Werte beträgt $\sigma_p = 5,2$ hPa. Ohne eine Hochspannungsregelung wäre eine relative Standardabweichung der m_i von etwa

$$k_p \cdot \sigma_p = 1,2 \text{ \%/hPa} \cdot 5,2 \text{ hPa} \approx 6\%$$

zu erwarten.

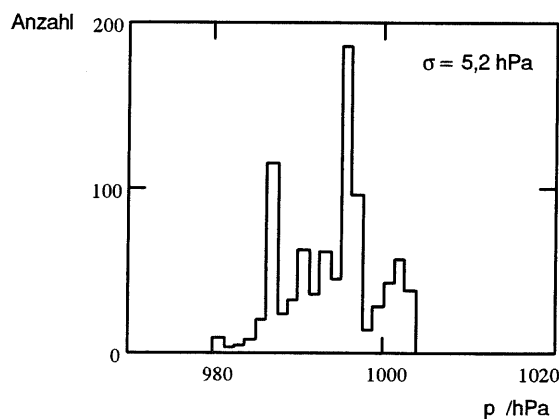


Abbildung 5.11 : Häufigkeit der gemessenen Druckwerte

Das erste Diagramm (unkorrigiert) in Abbildung 5.12 zeigt dagegen die Verteilung der gemessenen m_i , ihre relative Standardabweichung ist mit 1,9 % etwa um den Faktor 3 kleiner. Die vorhandene Hochspannungsregelung führt also zu einer Stabilisierung des Verhaltens der Streamerrohrkammern.

Das zweite Diagramm (p-korrigiert) zeigt die Verteilung der m_i , die die oben beschriebene optimale Hochspannungsregelung in Abhängigkeit vom Luftdruck

mit der Regelungskonstanten $C^{(\text{neu})}$ geliefert hätte. Ihre Stabilität ($\sigma_{\text{rel.}} = 1,3 \%$) ist gegenüber den unkorrigierten Werten verbessert.

Im dritten Diagramm (p&T-korrigiert) ist die Verteilung der m_i zu sehen, aus denen zusätzlich die Temperaturabhängigkeit herausgerechnet wurde. Die Standardabweichung ($\sigma_{\text{rel.}} = 1,3 \%$) ist kaum geringer als die der Werte des zweiten Diagramms. Insofern bräute eine zusätzliche Regelung der Hochspannung in Abhängigkeit von der Temperatur kaum eine Verbesserung der Stabilität.

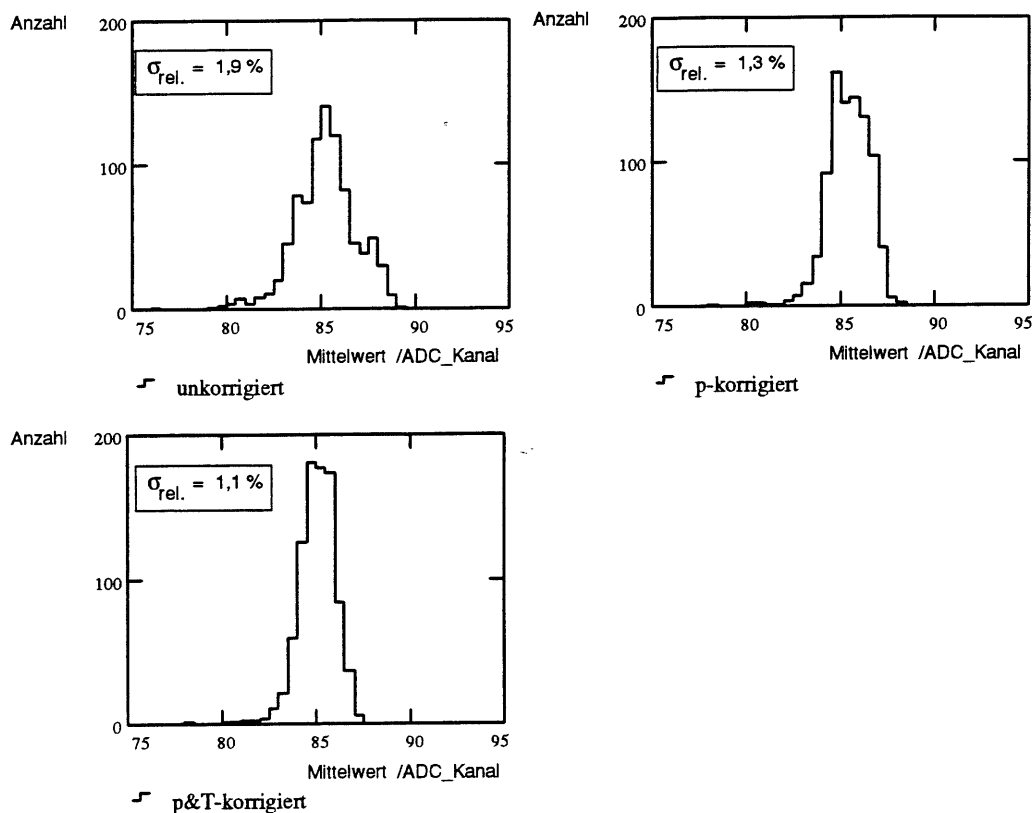


Abbildung 5.12 : Häufigkeiten der Spektrenmittelwerte

Zum Verhalten der Temperatur am H1 Detektor

Die Abbildung 5.13 zeigt einen Ausschnitt aus dem Temperaturverlauf am H1 Detektor während des Abschnitts I. Die quadratischen Markierungen in der Mitte des Diagramms kennzeichnen jeweils das Ende eines Datennahme-Zeitraums ('run'). Es sind einige Zeiträume erkennbar, in denen eine kontinuierliche Datennahme erfolgte, hier überlagern sich die Quadrate der einzelnen 'runs' zu einer Linie.

Zu Beginn dieser Zeiträume steigt die Temperatur mit einer geringen Verzögerung um etwa 1°C an, am Ende fällt sie wieder ab.

Dieses Verhalten liegt vermutlich an der Erwärmung einiger Detektorelemente, beziehungsweise ihrer Elektronik, während der Datennahme.

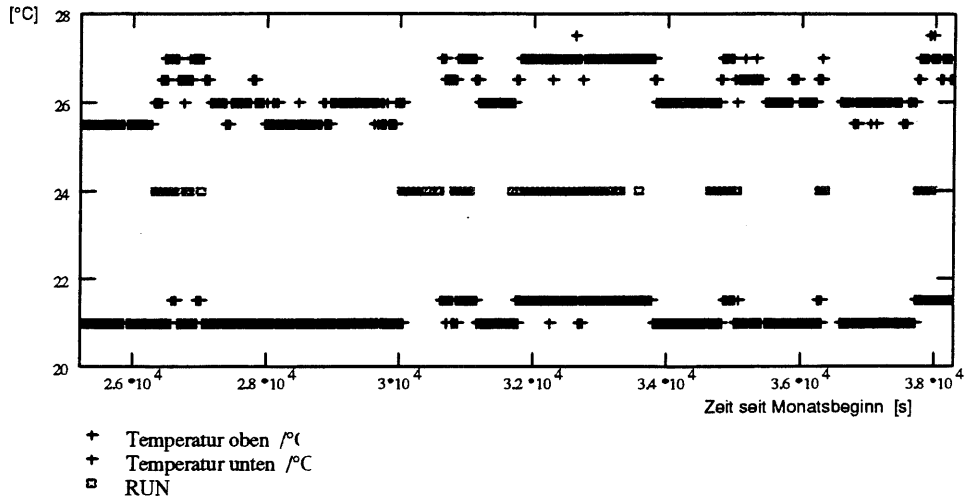


Abbildung 5.13 : Zum Temperaturverlauf am H1 Detektor

5.4. Entstehung der Pulshöhenspektren des H1 Restkalorimeters

Das Signal eines Restkalorimeter-Turmes entsteht durch analoge Addition der Signale der im Turm zusammengefaßten Streamerrohrkammern (Kapitel 1.3). Im Folgenden wird die Entstehung des Pulshöhenspektrums eines Turmes aus den Spektren der zugehörigen Streamerrohrkammern betrachtet.

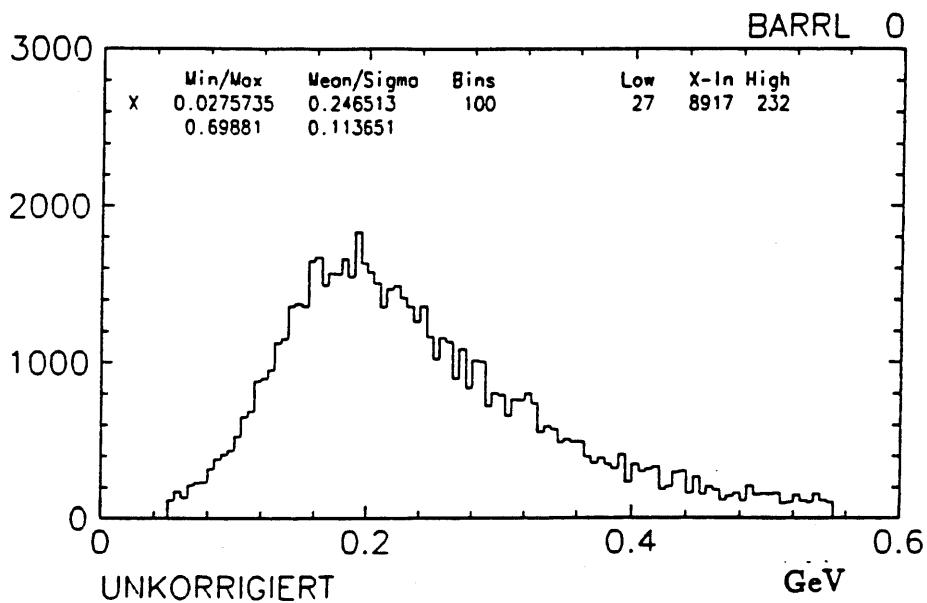


Abbildung 5.14 : Pulshöhenspektrum eines Restkalorimeter-Turmes bei kosmischer Strahlung [BÜN92]

Abbildung 5.14 zeigt ein Spektrum eines Turmes, das beim Durchgang kosmischer Myonen durch den Turm aufgezeichnet wurde.

Betrachtet man die Spektren als Wahrscheinlichkeitsfunktionen diskreter Zufallsgrößen (abgesehen von der Normierung), so ergibt sich der Verlauf des Turmspektrums gemäß der folgenden Überlegung.

Gegeben sei eine diskrete Zufallsgröße X , die die Werte x_i annehmen kann, und die durch die Wahrscheinlichkeitsfunktion p_x beschrieben ist

$$p_x = \begin{cases} P(X = x_i) & \text{für } x \in \{x_i\} \\ 0 & \text{sonst} \end{cases}$$

Die Wahrscheinlichkeitsfunktion p_{xx} der Summe zweier durch p_x beschriebener Zufallsgrößen ergibt sich als diskrete Faltung von p_x mit sich selbst:

$$p_{xx}(y) = (p_x * p_x)(y) \equiv \sum_{x_i} p_x(x_i) \cdot p_x(y - x_i)$$

Denn die Wahrscheinlichkeit dafür, daß die Summe den Wert y annimmt, ergibt sich als Summe der Wahrscheinlichkeiten aller Fälle, in denen der erste Summand einen Wert x , der zweite den Wert $y-x$ annimmt.

Die Wahrscheinlichkeitsfunktion von höheren Vielfachen ergibt sich durch wiederholte Faltung mit p_x , zum Beispiel $p_{xxx} = p_x * p_{xx}$.

In Abb. 5.15 ist eine solche wiederholte Faltung exemplarisch für das Spektrum (a) einer Streamerrohrkammer durchgeführt, der Verlauf der fünffachen Faltung (b) ist qualitativ dem in Abbildung 5.14 ähnlich.

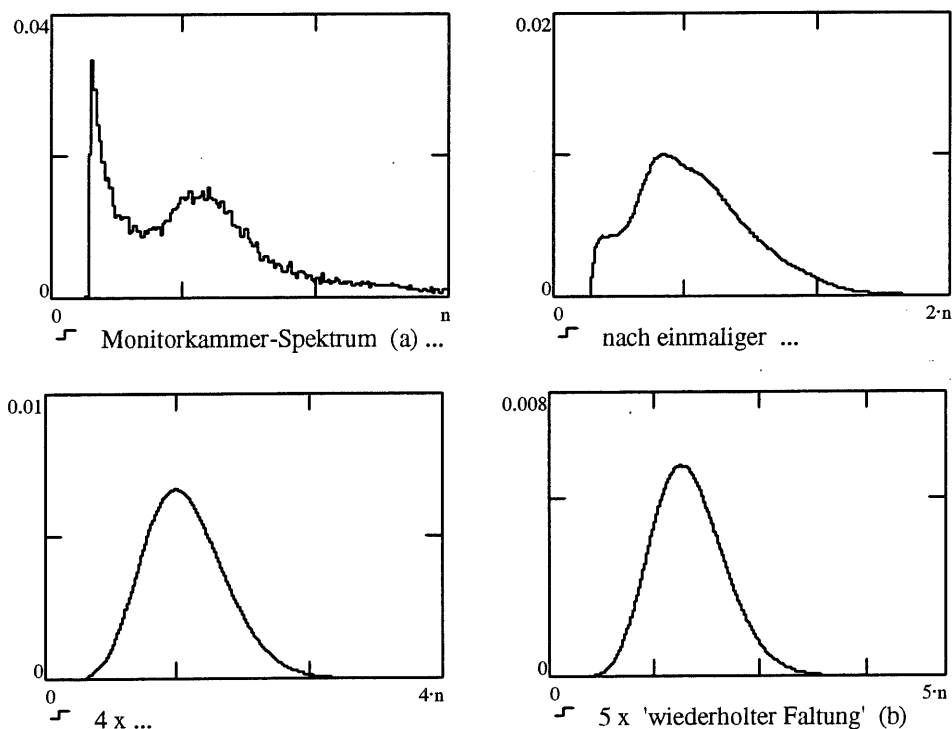


Abb. 5.15 : Vom Streamerrohrkammer- zum Turmspektrum
(die Diagramme sind unterschiedlich skaliert)

Das unterschiedliche Aussehen der Pulshöhenspektren von Monitorkammern und Restkalorimeter-Türmen ist also durch die Summation der Kammersignale innerhalb eines Turmes erklärbar. Es ist kein Hinweis auf ein abweichendes Verhalten der Monitorkammern von den Streamerrohrkammern des Instrumentierten Eisens.

6. Zusammenfassung

Die vorliegende Arbeit beschreibt einige Untersuchungen über das Verhalten der Streamerrohrkammern im Instrumentierten Eisen des H1 Detektors. Darüber hinaus werden einige Fragestellungen zur Überwachung dieser Kammern mit Hilfe sogenannter Monitorkammern behandelt. Die Ergebnisse der vorgenommenen Untersuchungen seien im Folgenden zusammengefaßt.

Im Rahmen der Labormessungen zeigten die Streamerrohrkammern bei einer Bestrahlung durch verschiedene Teilchenquellen das gleiche Verhalten. Das rechtfertigt die Verwendung der Monitorkammern bei der Überwachung der Streamerrohrkammern im Instrumentierten Eisen.

Die am Instrumentierten Eisen vorgenommenen Messungen zeigen, daß die Gasqualität verschiedener Gaskreisläufe keine wesentlichen Unterschiede aufweist. Insbesondere ist der Unterschied der Gasqualität zwischen dem Ein- und Ausgang bei allen vermessenen Kreisläufen etwa gleich groß. Insofern ist die Installation weiterer Monitorkammern - oder die Mischung des Gases mehrerer Gasausgänge vor dem Durchströmen einer Monitorkammer - für die Überwachung der Streamerrohrkammern nicht erforderlich.

Die Hochspannungsregelung der Streamerrohrkammern im Instrumentierten Eisen erwies sich bei den durchgeführten Untersuchungen als zuverlässig. In [NOR92] wurde aus Labormessungen ein Wert von $C = 2,75 \text{ V/hPa}$ für die Hochspannungs-Regelungskonstante bestimmt. Dieser Wert wurde durch die vorliegenden Untersuchungen am H1 Detektor bestätigt.

Die an Monitorkammern gemessene Pulshöhenspektren zeigen einen qualitativ anderen Verlauf als die am Restkalorimeter des H1 Detektors gemessenen Spektren. Die dargestellten Überlegungen zeigen, daß dieser Unterschied durch die Summation der Signale einiger Streamerrohrkammern in den Türmen des Restkalorimeters entsteht.

Abbildungsverzeichnis

1.1 HERA.....	3
1.2 Der H1-Detektor	4
1.3 Streamerrohr.....	6
1.4 Streamerrohrkammer-Element.....	6
1.5 Anordnung der Streamerrohrkammern im Instrumentierten Eisen	7
1.6 Zur Bezeichnung der Gaskreisläufe des Instrumentierten Eisens.....	8
3.1 Betriebsspannungskennlinie eines Zählrohres.....	13
3.2 Streamer- und Proportionalladung	14
3.3 Energieverlust durch Ionisation.....	16
3.4 Energiespektrum der Elektronen aus dem β -Zerfall von Neutronen	17
3.5 Energiespektrum der kosmischen Strahlung auf Meereshöhe.....	18
4.1 Monitorkammer	19
4.2 Zu den Unterschieden der Monitorkammern.....	20
4.3 Anordnung der Szintillatorplatten im Laboraufbau.....	21
4.4 Die Ausleseelektronik	22
4.5 Vorverstärker der Ausleseelektronik.....	23
4.6 Generatorpuls.....	24
4.7 Ladungseichung und Linearität.....	24
4.8 Zur Totzeit der Auslese.....	25
4.9 Die Monitorkammer-Auslese am H1	26
4.10 Typisches Pulshöhenspektrum einer Streamerrohrkammer.....	27
4.11 Verfahren zur Bestimmung der Lage des Streamerpeaks.....	29
4.12 Zur Stabilität der Verfahren zur Spektrenauswertung.....	30
5.1 Untergrundspektrum bei Messung mit der β -Quelle.....	31
5.2 Streamerrohrspektren bei Bestrahlung mit Elektronen oder kosmischer Strahlung	32
5.3 Streamerladung in Abhängigkeit von der Hochspannung	33
5.4 Raten in Abhängigkeit von der Hochspannung	34
5.5 Vergleich einiger Gaskreisläufe des Instrumentierten Eisens	34
5.6 Einige Monitorkammerspektren aus verschiedenen Gaskreisläufen des Instrumentierten Eisens.....	35
5.7 Zur Reproduzierbarkeit der Vergleichsmessungen.....	36
5.8 Meßwerte der Streamerrohrkammer-Überwachung	37
5.9 Temperaturabhängigkeit der Streamerladung.....	38

5.10 Druckabhängigkeit der Streamerladung	39
5.11 Häufigkeit der gemessenen Druckwerte	40
5.12 Häufigkeiten der Spektrenmittelwerte	41
5.13 Zum Temperaturverlauf am H1 Detektor.....	42
5.14 Pulshöhenspektrum eines Restkalorimeter-Turmes bei kosmischer Strahlung	42
5.15 Vom Streamerrohrkammer- zum Turmspektrum	43

Literaturverzeichnis

- [BER64] M.J. Berger, S.M. Seltzer, Tables of energy losses and ranges of electrons and positrons, NASA SP-3012, 1964
- [BRO87] I.N. Bronstein, Taschenbuch der Mathematik 23. Auflage, Verlag Harry Deutsch, 1987
- [BRÜ90] J. Bründel, Untersuchungen der Influenzsignale auf den Cu-Streifen der H1-Streamerrohrkammern, DESY F22-90-04, 1990
- [BÜN92] L. Büngener, Interkalibration der Türme des H1-Tailcatchers, Diplomarbeit, Hamburg 1992
- [COZ92] G. Cozzika, The H1 detector, H1-10/92-252, 1992
- [DÜN90] O. Dünger, Untersuchungen an nichtbrennbaren Gasmischungen für H1-Streamerrohrkammern, Diplomarbeit, Hamburg 1990
- [DÜN92] O. Dünger, internes Papier
- [GES90] K. Geske et al., The digital electronics of the H1 streamer tube detector, H1LSTEC 90-8, 1990
- [HAY69] S. Hayakawa, Cosmic ray physics : Nuclear and astrophysical aspects, Wiley, 1969
- [IAR83] E. Iarocci, Plastic streamer tubes and their applications in high energy physics, NIM 217, 1983
- [JEL90] N.A. Jelley, Fundamentals of nuclear physics, Cambridge University Press, 1990
- [KLE86] K. Kleinknecht, Detectors for particle radiation, Cambridge University Press, 1986
- [KNO89] G.F. Knoll, Radiation detection and measurement 2nd ed., Wiley, 1989
- [KRA92] B. Krames, Untersuchungen zum Streamer-Mechanismus und zur Optimierung der Betriebseigenschaften der H1-Myon-Kammern, Diplomarbeit, Aachen 1992
- [LIP92] J. Lipinski, Überwachung des H1-Streamerrohrsystems, Diplomarbeit, Hamburg 1992
- [NOR92] F. Norporth, Hochspannungsregelung der Streamerrohrkammern des H1-Detektors, Diplomarbeit, Hamburg 1992
- [NUM89] W.H. Press, Numerical recipes in pascal, Cambridge University Press, 1989

- [PAR90] Particle Data Group, Particle properties data booklet, North-Holland, 1990
- [PER87] D.H. Perkins, Introduction to high energy physics 3rd ed., Addison Wesley, 1987
- [TUT92] J. Tutas, The limited streamer tube system of H1, H1-10/92-246, 1992
- [WII92] B.H. Wiik, HERA Status, In : Physics at HERA, proceedings of the HERA workshop Vol. 1, Hamburg 1992
- [ZIE81] J.F. Ziegler, The background in detectors caused by sea level cosmic rays, NIM 191, 1981
- [ZIT92] S.Zitzen, Untersuchungen zum Streamermode von Gasentladungsdetektoren, Entwicklung und Überprüfung eines numerischen Modells zur quantitativen Beschreibung von Gasentladungsdetektoren, Dissertation, Aachen 1992

Danksagung

Ich danke Herrn Professor Büßer für die Aufgabenstellung und die aufmerksame Betreuung dieser Arbeit. Darüber hinaus danke ich ihm für manch Lehrreiches im Verlaufe meines Studiums.

Den Mitarbeitern der Neutrino-Gruppe danke ich für ihre Hilfsbereitschaft, die gute Zusammenarbeit und eine angenehme Arbeitsatmosphäre.

Der Elektronikwerkstatt sowie der Gruppe TEB danke ich für die ständige Bereitschaft zur Unterstützung.

Bei den Diplomanden C. Reich und C. Wittek bedanke ich mich für die freundliche Zusammenarbeit.

Schließlich danke ich meinen Eltern für die Ermöglichung meines Physikstudiums, das durch die vorliegende Arbeit seinen Abschluß findet.

Erklärung

Hiermit erkläre ich, daß ich die vorliegende Arbeit selbständig und unter Angabe aller wesentlichen Quellen angefertigt habe.

Hamburg den 12. Dezember 1993