Untersuchungen zum Verhalten der Ausleseelektronik des H1-Flüssigargon Kalorimeters

März 1998

Diplomarbeit
vorgelegt von

Markus Borowski

Lehrstuhl für
experimentelle Physik V
Fachbereich Physik
Universität Dortmund

Inhaltsverzeichnis

Kapitel 1

Einleitung

Seit frühester Zeit interessieren sich Menschen für die Welt, die sie umgibt. Immer stellten sie sich die Fragen: Woraus besteht die Welt und was sind die Kräfte, die alles zusammenhalten? Demokrit schrieb:,, Scheinbar ist Farbe, scheinbar Süßigkeit, scheinbar Bitterkeit: wirklich nur Atome und Leeres" [1]. Vor Anfang des 19. Jahrhunderts waren jedoch keine begründeten Annahmen über den Aufbau von Materie vorhanden. Die Idee von Atomen als elementaren Bausteinen der Materie wurde erst 1805 von J. Dalton im Zusammenhang mit seinen Arbeiten zu stöchiometrischen Grundgesetzen wiederbelebt.
1909 fanden Geiger und Marsden bei Streuversuchen von α-Teilchen an einer dünnen Goldfolie, daß die Streuwinkel teilweise unerklärlich groß waren [3]. Dieses veranlaßte E. Rutherford 1911 zu der Hypothese [2], daß auch Atome zusammengesetzt sind, und zwar aus einem schweren, positiv geladenen Kern und einer im Vergleich dazu ausgedehnten und leichten Elektronenhülle.
1927 zeigte W. Heisenberg, daß in quantenmechanischen Systemen für ein Teilchen die Meßgrößen ‚Ort' und ‚Impuls' nicht beliebig genau bestimmt werden können [4]. Es gilt $\Delta p \cdot \Delta x \gtrsim \hbar$. Um Strukturen der Größenordnung Δx aufzulösen, ist somit ein Impuls notwendig, der mindestens die Größe $\Delta p = \frac{\hbar}{\Delta x}$ hat.
Dieser Überlegung folgend wies R. Hofstadter 1956 durch den Beschuß von ruhenden Protonen mit 400 MeV-Elektronen nach, daß auch das Proton nicht punktförmig ist [5], sondern eine Ausdehnung von ca. 0,8 fm hat. Die Auflösung des Protons in Konstituenten ,,Partonen" gelang erstmalig 1968 am SLAC[1] [6].

Parallel zu den Experimenten werden die theoretischen Erklärungen der gefundenen Effekte verbessert. Heutzutage erfolgt die Beschreibung der Wechselwirkung von Teilchen durch das Standardmodell der Teilchenphysik. Dieses ist eine Zusammenfassung von drei fundamentalen Wechselwirkungen. Einerseits gibt es die elektroschwache Wechselwirkung, zu der 1961 und 1968 Glashow, Salam und Weinberg (GWS) [8] die elektromagnetische und die schwache Wechselwirkung vereinigten. Andererseits existiert die starke Wechselwirkung, deren Beschreibung 1973 Fritzsch, Gell-Mann und Leutwyler lieferten (QCD) [7]. Die Gravitation als vierte elementare Wechselwirkung entzieht sich bis heute einer Quantisierung und somit der Einbettung in das Konzept der anderen Quantenfeldtheori-

---

[1] Stanford Linear Accelerator Center

en.

Auf experimenteller Seite wird bis heute die erfolgreiche Methode von Streuexperimenten zur Untersuchung kleiner Strukturen beibehalten. Es werden dabei immer größere Beschleuniger für die Teilchen gebaut, um die Energien zur Untersuchung kleinerer Strukturen aufzubringen. Ebenso nehmen die Experimente dabei im Laufe der Zeit an Komplexität und Größe zu.

Eines der Experimente ist das H1-Experiment am HERA[2]-Speicherring des DESY[3]. Bei HERA erlauben Schwerpunktsenergien von 300 GeV im Elektron-Proton-System sehr genaue Tests der QCD sowie die Suche nach noch unbekannten Teilchen. Es gelingt zudem, die Strukturfunktionen von Proton und Photon in einem großen Bereich der Bjorken-Skalenvariablen x und des Impulsübertrags Q^2 zwischen den wechselwirkenden Teilchen Q^2 mit hoher Präzision zu messen.

Die Möglichkeit, neue physikalische Erkenntnisse bei H1 zu erzielen, wird dabei durch die Genauigkeit begrenzt, mit der eine Rekonstruktion der Streuprozesse erfolgen kann. Diese Genauigkeit zu erhöhen, ist das Ziel der vorliegenden Arbeit. Es wird dazu die Genauigkeit der Energierekonstruktion des Flüssigargon-Kalorimeters am H1-Experiment überprüft und an einigen Stellen verbessert. Speziell sind im Rahmen dieser Arbeit erstmalig Untersuchungen zum Verhalten der Ausleseelektronik bei kleinen Signalhöhen durchgeführt worden. Die Ergebnisse hierzu werden in Kapitel 3 dargestellt, nachdem in Kapitel 2 eine kurze Einführung in die für die Arbeit benötigten Detektorkomponenten gegeben wird. Kapitel 2 enthält zudem eine ausführliche Darstellung des elektronischen Systems, mit dem Trigger- und Auslesesignale des Flüssigargon-Kalorimeters verarbeitet werden.

Ein weiterer begrenzender Faktor bei physikalischen Untersuchungen ist das Rauschen der Ausleseelektronik. Zum einen begrenzt das den ausgelesenen Signalen überlagerte Rauschen die Energieauflösung, zum anderen wirft es bei der Datennahme Probleme auf. Schwellenwerte bei der Datennahme, die den Einfluß des Rauschens verringern, bewirken Verluste beim Registrieren physikalischer Ereignisse. Seit 1996 erfolgt daher in mehreren Phasen eine teilweise Erneuerung der Ausleseelektronik des Flüssigargon-Kalorimeters des H1-Experimentes (Upgrade) mit dem Ziel, das Rauschen zu reduzieren. In Kapitel 4 werden zunächst die vorhandenen Rauschquellen sowie die Struktur des Rauschens der Auslesekette des Flüssigargon-Kalorimeters dargestellt. Danach werden in Kapitel 5 erste Ergebnisse des Upgrades dargestellt.

In Kapitel 6 werden die Auswirkungen einiger Ergebnisse aus den Kapiteln 3 und 5 auf die Datennahme und auf Analysen bei H1 dargestellt. Hierzu werden die Signale untersucht, welche Halo-Myonen beim Durchqueren des H1-Detektors hinterlassen.

---

[2] Hadron-Elektron-Ring-Anlage

[3] Deutsches Elektronen-Synchrotron

Kapitel 2

Das H1-Experiment

2.1 Der HERA-Speicherring

Am Deutschen Elektronen-Synchrotron DESY in Hamburg befindet sich der Elektron-Proton-Speicherring HERA. Dieses ist weltweit der einzige Speicherring, an dem hochenergetische Elektronen- und Protonenstrahlen gespeichert werden.

Nach mehreren Vorbeschleunigerstufen werden Elektronen[1] von 12 GeV bzw. Protonen von 40 GeV in den eigentlichen HERA-Ring injiziert (s. Abb. 2.1/links) und dort auf die jeweilige Endenergie beschleunigt. Diese beträgt für Elektronen 27,5 GeV und für Protonen 820 GeV.

An vier Stellen des Speicherringes sind Großexperimente aufgebaut (s. Abb. 2.1/rechts). In den Experimenten *H1* [9] und *ZEUS* [10] werden die ansonsten in zwei getrennten Strahlrohren gespeicherten Elektronen und Protonen zur Kollision gebracht. Die bei der Kollision zur Verfügung stehende Schwerpunktsenergie von 300 GeV ermöglicht es, die Struktur des Protons bis zu einer Größenordnung von 10^{-18}m zu erforschen. Die beiden weiteren Experimente benötigen nur jeweils einen der beiden Teilchenstrahlen. Bei *HERMES* [11] werden in der Experimentierhalle Ost die polarisierten Elektronen durch eine polarisierte Gas-Probe geleitet. Von den Ergebnissen dieses Experimentes werden Aufschlüsse über die polarisierten Strukturfunktionen der Protonen erhofft. In der Experimentierhalle West befindet sich das Experiment *HERA-B* [12] im Aufbau. Es sollen hier die Protonen aus dem Halo des Protonenstrahls mit dünnen Drähten als Streuzentren zur Kollision gebracht werden. Das Ziel dieses Experimentes ist die Untersuchung einer möglichen CP-Verletzung im $\mathrm{B}^0\overline{\mathrm{B}^0}$-System.

2.2 Der H1-Detektor

Diese Arbeit wurde im Rahmen der H1-Kollaboration durchgeführt, welcher derzeit über 400 Physiker aus 13 Ländern angehören.

---

[1] In den Datennahmeperioden 1996 und 1997 wurden an Stelle der Elektronen Positronen verwendet.

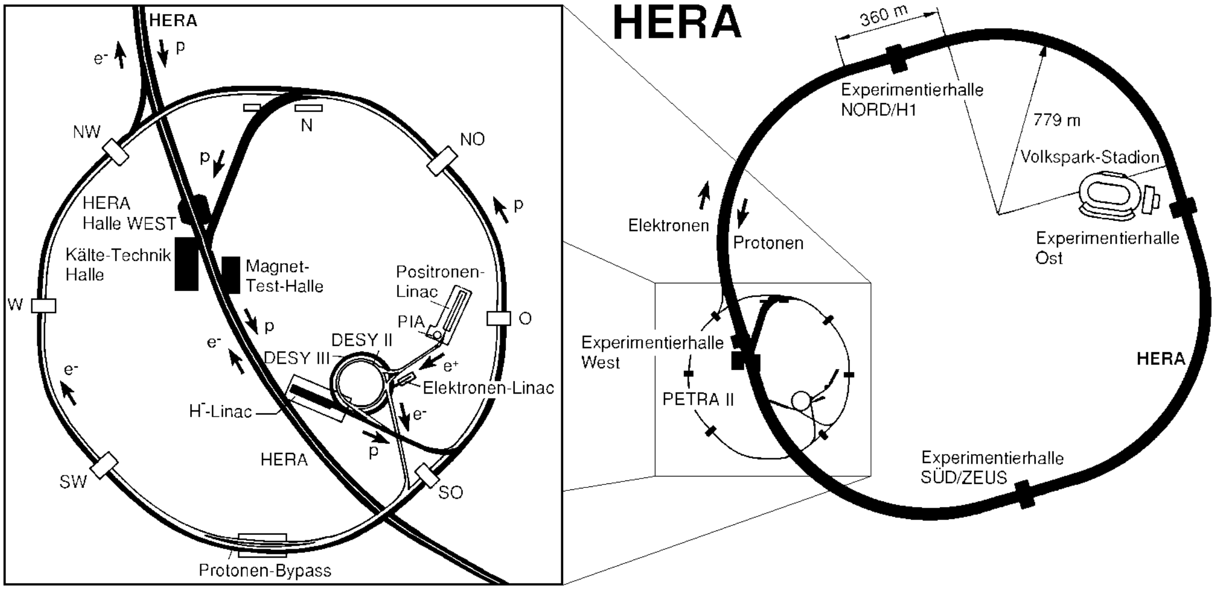


Abbildung 2.1: *Der HERA-Speicherring; links: Vorbeschleuniger und Injektionsstellen der Teilchenpakete; rechts: Gesamtansicht des Ringes*

Der H1-Detektor (s. Abb. 2.2) [9] ist ein Vielzweckdetektor zum Nachweis geladener und neutraler Teilchen. Er ist durch seinen hermetischen Aufbau in der Lage, sowohl den hadronischen als auch den leptonischen Endzustand des Streuprozesses zu beobachten. Der asymmetrische Aufbau des Detektors ergibt sich aus den unterschiedlich großen Impulsen von Elektronen und Protonen und der damit zu erwartenden typischen Ereignistopologie. Der nominelle Wechselwirkungspunkt der Teilchen ist in Abbildung 2.2 durch die Markierung $\boxed{1}$ angedeutet.

Die bei den Kollisionen von Elektronen und Protonen gebildeten Reaktionsprodukte bewegen sich in einem Magnetfeld von 1,15 T. Die Spuren geladener Teilchen sind dadurch gekrümmt, was mit Hilfe der Spurkammern eine Bestimmung des Impulses der Teilchen erlaubt. Das Spurkammersystem ist von verschiedenen Kalorimetern umgeben, welche die Messung der Teilchenenergien ermöglichen. Von hauptsächlichem Interesse in dieser Arbeit ist das Flüssigargon-Kalorimeter $\boxed{3}\boxed{4}$. Noch weiter vom Wechselwirkungspunkt entfernt sind die Detektorkomponenten zum Nachweis der Myonen. Diese Komponenten befinden sich einerseits in dem Eisen-Joch $\boxed{6}$, in dem das Magnetfeld der supraleitenden Spule $\boxed{5}$ zurückgeführt wird und andererseits in einem speziellen vorwärtigen Myon-System $\boxed{8}\boxed{9}$.

Das bei H1 gebräuchliche Koordinatensystem ist in Abbildung 2.2 dargestellt. Das kartesische Koordinatensystem ist so gewählt, daß die z-Achse mit der Protonflugrichtung übereinstimmt und die x-Achse zum Mittelpunkt des HERA-Ringes zeigt. Der Nullpunkt des Koordinatensystems ist in das Zentrum des zentralen Spurkammersystems $\boxed{2}$ gelegt. Wird in der weiteren Arbeit von „vorne“ gesprochen, so ist damit der Bereich des Detektors gemeint, der für die einlaufenden Protonen hinter dem Wechselwirkungspunkt liegt. „Hinten“ bezeichnet entsprechend den Bereich vor dem Wechselwirkungspunkt. Vielfach

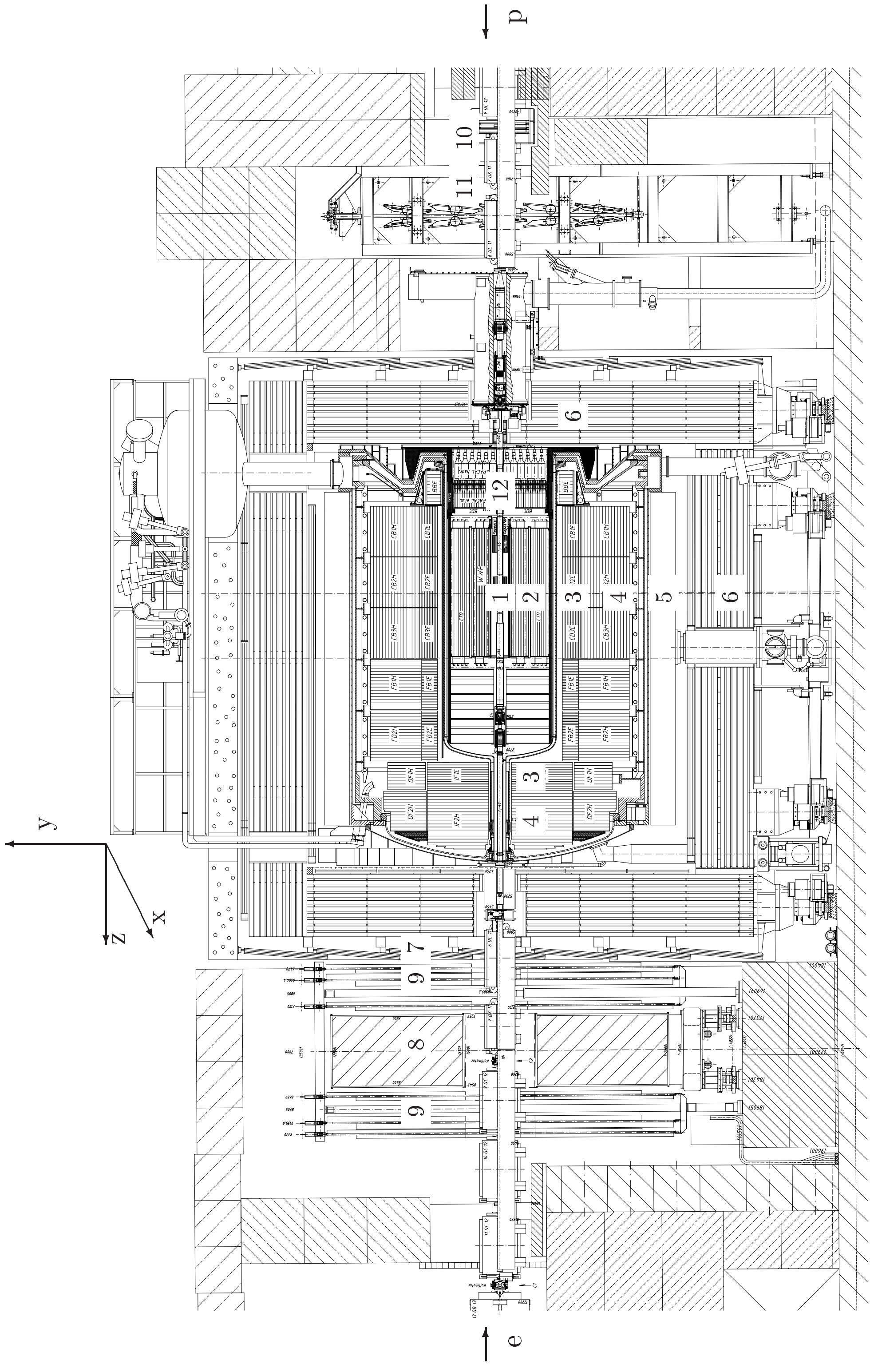


Abbildung 2.2: Übersicht über den H1-Detektor. [9]

1 Wechselwirkungspunkt
2 Zentrale Spurkammern
3 Elektromagnetisches LAr – Kalorimeter
4 Hadronisches LAr – Kalorimeter
5 Supraleitende Magnetspule
6 Instrumentiertes Eisenjoch
7 Myon-Kammern
8 Myon-Toroidmagnet
9 Driftkammern des Myon – Spektrometers
10 Innere Veto-Wand
11 Äußere Veto Wand
12 SpaCal

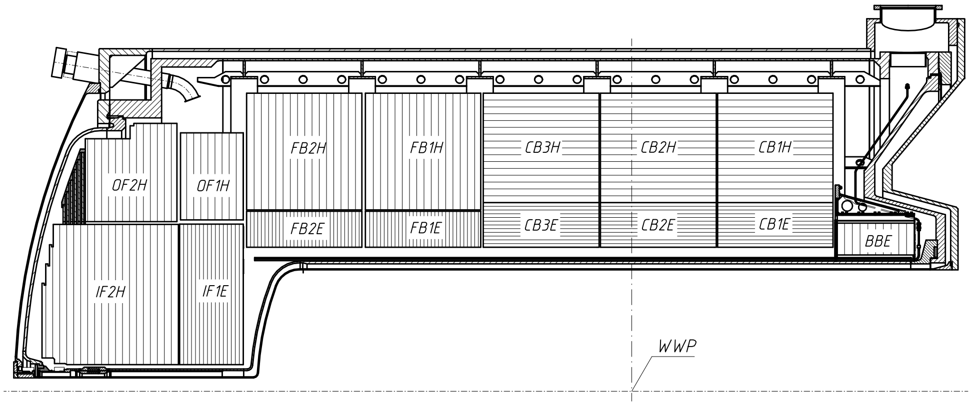


Abbildung 2.3: *Schnitt durch die obere Hälfte des Flüssigargon-Kalorimeters mit angedeuteter Orientierung der Ausleseplatten; WWP bezeichnet die Lage des nominellen Wechselwirkungspunktes; die offiziellen Bezeichnungen der verschiedenen Sektionen des LAr-Kalorimeters sind in der Abbildung vermerkt*

werden bei H1 zur Angabe von Richtungen der Polarwinkel θ sowie der Azimutalwinkel ϕ benutzt. θ bezeichnet dabei den von der z-Achse aus gemessenen Winkel zwischen der z-Achse und der Verbindungslinie eines Punktes mit dem Wechselwirkungspunkt. Mit ϕ wird der von der x-Achse aus gemessene Winkel in der x-y-Ebene bezeichnet.

Im folgenden werden die für diese Arbeit wichtigen Detektorkomponenten genauer beschrieben. Für weitere Informationen sei auf [9] verwiesen.

2.2.1 Das Flüssigargon-Kalorimeter

Das Flüssigargon-(LAr-)[2]Kalorimeter [13] deckt einen Polarwinkelbereich von 4° bis 154° beim H1-Detektor ab. Es ist als Schichtkalorimeter gebaut, dessen aktives Medium flüssiges Argon mit einer Temperatur von 88,8 K [14] ist. Die Orientierung der Schichten ist dabei so, daß vom Wechselwirkungspunkt kommende Teilchen unter möglichst kleinen Winkeln zum Lot hindurchtreten (s. Abb 2.3). Der erforderliche Kühlaufwand des Argons wird durch eine Reihe von Vorteilen aufgewogen:

- Argon ist als Edelgas strahlungsresistent,
- Argon verbindet die Vorteile einer hohen Dichte ($\varrho = 1,4\,\mathrm{g/cm^3}$) mit einer niedrigen Ionisationsenergie (23,6 eV pro Ionenpaar)
- Argon ermöglicht durch große Homogenität eine feine Granularität der Auslesestruktur.

---

[2] von liquid argon - Flüssigargon

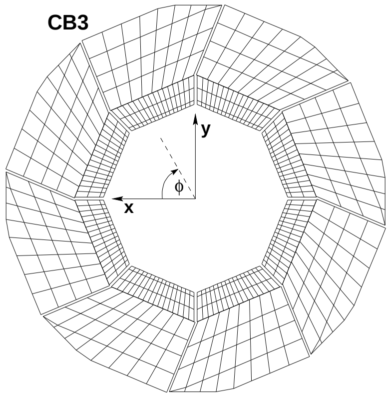


Abbildung 2.4: *Aufsicht des Rades CB3; es ist die innere, elektromagnetische und die äußere, hadronische Sektion zu erkennen*

Das LAr-Kalorimeter ist aus acht unabhängigen Rädern (s. Abb. 2.4) aufgebaut, von denen die vorderen sieben Räder aus je einer inneren und einer äußeren Sektion bestehen (s. Abb. 2.3). Bei den Kalorimeter-Rädern zwei bis sechs unterscheiden sich jeweils die beiden Sektionen in ihrem Aufbau und Zweck. Die innere (elektromagnetische) Sektion dient primär dem Nachweis von Elektronen und Photonen, die bei Teilchenkollisionen entstehen. Die äußere (hadronische) Sektion ist deutlich größer als die elektromagnetische; sie ist für den Nachweis der Energie hadronischer Teilchen ausgelegt, deren Energiedepositionen gewöhnlich über einen großen Bereich verteilt sind. Das BBE (s. Abb. 2.3) besteht nur aus einer elektromagnetischen Sektion, die beiden Sektionen des vordersten Rades IF2H/OF2H sind vom Aufbau her hadronische Sektionen. Die elektromagnetische und die hadronische Sektion eines jeden Rades ist aus acht identischen Modulen aufgebaut (s. Abb. 2.4). Eine Ausnahme hiervon bilden die Sektionen IF1E und IF2H, die aus zwei zusammengesetzten Halbrädern bestehen.

In elektromagnetischen Sektionen stellt jedes Modul im wesentlichen eine Abfolge von 2,36 mm dicken Bleiplatten zum Aufschauern passierender Teilchen und 2,35 mm Zwischenraum dar. In diesem Zwischenraum befindet sich das flüssige Argon. Die Bleiplatten sind abwechselnd in Hochspannungs- (HV-) und Ausleseplatten (s. Abb. 2.5/oben) aufgeteilt. Bei den HV-Platten ist als äußerste Lage eine hochohmige Ruß-Leim-Beschichtung (HRC[3]) mit $R \approx 5\mathrm{M}\Omega/\mathrm{cm}^2$ aufgebracht. Über die HRC liegt eine Spannung von nominell 1,5 kV zu der gegenüberliegenden Ausleseplatte an. Auf den Ausleseplatten ist als äußerste Lage eine segmentierte Kupferschicht aufgebracht.

In hadronischen Modulen sind die Bereiche zum Aufschauern passierender Teilchen und die Auslesestruktur klar getrennt (s. Abb. 2.5/unten). Zum Aufschauern der Teilchen dienen 16 mm dicke Stahlplatten. Die Auslesestruktur wird durch zwei weitere, 1,5 cm dicke Stahlplatten begrenzt, die auf der Innenseite der Auslesestruktur mit HRC beschichtet sind. Diese Platten bilden die HV-Platten in den hadronischen Sektionen des

---

[3] high resistive coating $\hat{=}$ Hochwiderstands-Beschichtung

Abbildung 2.5: *Aufbau der Auslesezellen des LAr-Kalorimeters (Angaben in μm); oben: Aufbau in elektromagnetischen Sektionen; unten: Aufbau in hadronischen Sektionen; die wichtigsten Bestandteile der Auslesezellen werden im Text erklärt, für weitere Informationen sei auf [13] verwiesen*

LAr-Kalorimeters. Eine Ausnahme bilden die HV-Platten des CBH[4]. Dort ist eine Kupferbeschichtung anstelle des HRC aufgebracht. Über die HRC bzw. die Kupferbeschichtung der HV-Platten liegt auch in den hadronischen Sektionen eine Spannung von nominell 1,5 kV zu den Ausleseplatten an. Mittig in der Auslesestruktur ist eine Platte aus Fiberglas (G10) angebracht, die doppelseitig mit einer segmentierten Kupferschicht versehen ist. Diese Platte stellt die Ausleseplatte in hadronischen Sektionen des LAr-Kalorimeters dar. In Bereich zwischen der HV- und der Ausleseplatte befindet sich das flüssige Argon.

Die Anordnung aus der HV-Platte, dem Argon-Bereich und einem Kupfersegment der Ausleseplatte bildet jeweils eine kapazitive Signalquelle. Die eigentlichen Auslesezellen des LAr-Kalorimeters bestehen aus einer Parallelschaltung [15] von übereinanderliegenden Segmenten verschiedener Ausleseplatten eines Moduls. Insgesamt ist das LAr-Kalorimeter in 44352 Auslesezellen aufgeteilt. Durch die unterschiedliche Zahl zusammengefaßter Kupfersegmente, deren Grundfläche sowie dem Aufbau der Auslesezellen, haben die Kapazitäten der Auslesezellen in elektromagnetischen und hadronischen Sektionen des Kalorimeters unterschiedliche Größen. Wärend in elektromagnetischen Sektionen die Kapazität der Auslesezellen zwischen 0,5 nF und 18 nF variiert, liegt sie in hadronischen Sektionen zwischen 0,5 nF und 4,5 nF.

---

[4] CBH ist der Oberbegriff für die drei Sektionen CB1H, CB2H und CB3H

2.2.2 Das instrumentierte Eisen

Abbildung 2.2 zeigt, daß der Hauptdetektor des H1-Experimentes zur Rückführung des Magnetfeldes mit einem Eisenjoch umgeben ist. Zwischen den einzelnen Eisenplatten sind bei H1 Streamer-Röhren installiert [9]. Sie bestehen aus quadratischen Röhren von ca. $9 \cdot 9\,mm^2$, die eine Länge von 1-6 m haben. Auf der Innenseite der Röhren ist eine Graphitschicht mit ca. $10\,\frac{k\Omega}{cm^2}$ aufgebracht. Im Zentrum des Rohres befindet sich ein versilberter Kupfer-Beryllium-Draht, der den Auslesedraht der Apparatur bildet. Über die Graphitschicht liegt eine Spannung von ca. 4,5 kV zum Cu-Be-Draht an. Auf die Streamer-Rohrkammern sind streifenförmige (Strips) oder quadratische (Pads) Influenzelektroden geklebt. Die streifenförmigen Elektroden sind orthogonal zu den Auslesedrähten angeordnet und bieten daher zusammen mit diesen eine zweidimensionale Ortsinformation. Das instrumentierte Eisen ermöglicht somit eine Spurbestimmung von Teilchen, welche den Hauptdetektor verlassen. Die Spur wird mittels einer χ^2-Anpassung aus den Informationen der angesprochenen Auslesedrähte und der Strips bestimmt [16]. Weiterhin bieten die Pads die Möglichkeit zur Energiemessung. Damit kann die Energie von Teilchen bestimmt werden, die bei hadronischen Schauern nach außen aus LAr-Kalorimeter heraustreten.

In der weiteren Arbeit wird die vordere Seite des Eisen-Jochs als ,,vorderes instrumentiertes Eisen“ und die hintere Seite des Eisen-Jochs als ,,hinteres instrumentiertes Eisen“ bezeichnet.

Genauere Informationen zum instrumentierten Eisen finden sich in [9].

2.2.3 Die Veto-Wände

Es sind zwei Veto-Wände bei H1 installiert (s. Abb. 2.2), die z=-6,5 m bzw. z=-8,1 m vor dem Hauptdetektor angebracht sind. Sie bestehen aus großen Szintillatorplatten. Während die innere Veto-Wand $\boxed{10}$ den Bereich in Nähe des Strahlrohres abdeckt (100 x 90 cm^2), überdeckt die große Veto-Wand (5 x 4 m^2) $\boxed{11}$ nahezu die gesamte Rückseite des LAr-Kalorimeters. Ein die Szintillatorplatten durchquerendes Teilchen erzeugt ein Signal, daß im Trigger verarbeitet wird.

2.3 Das Trigger-System

Im H1-Detektor kollidieren alle 96 ns (HERA-Taktzyklus) die Teilchenpakete von Elektronen und Protonen, was einer möglichen Ereignisrate von 10,4 MHz entspricht. Es ist leicht einzusehen, daß mit einer so hohen Rate die Daten nicht verarbeitet werden können. Zudem ist die Rate an Ereignissen, in denen ein Elektron und ein Proton wechselwirken, deutlich kleiner als 10,4 MHz. Das H1-Triggersystem [17] (s. Abb. 2.6) hat die Aufgabe, anhand von schnell bestimmbaren Informationen zu entscheiden, ob bei einer Kollision der Teilchenpakete (BC[5]) eine interessante Wechselwirkung von Elektronen und Protonen

---

[5] engl. bunch-crossing

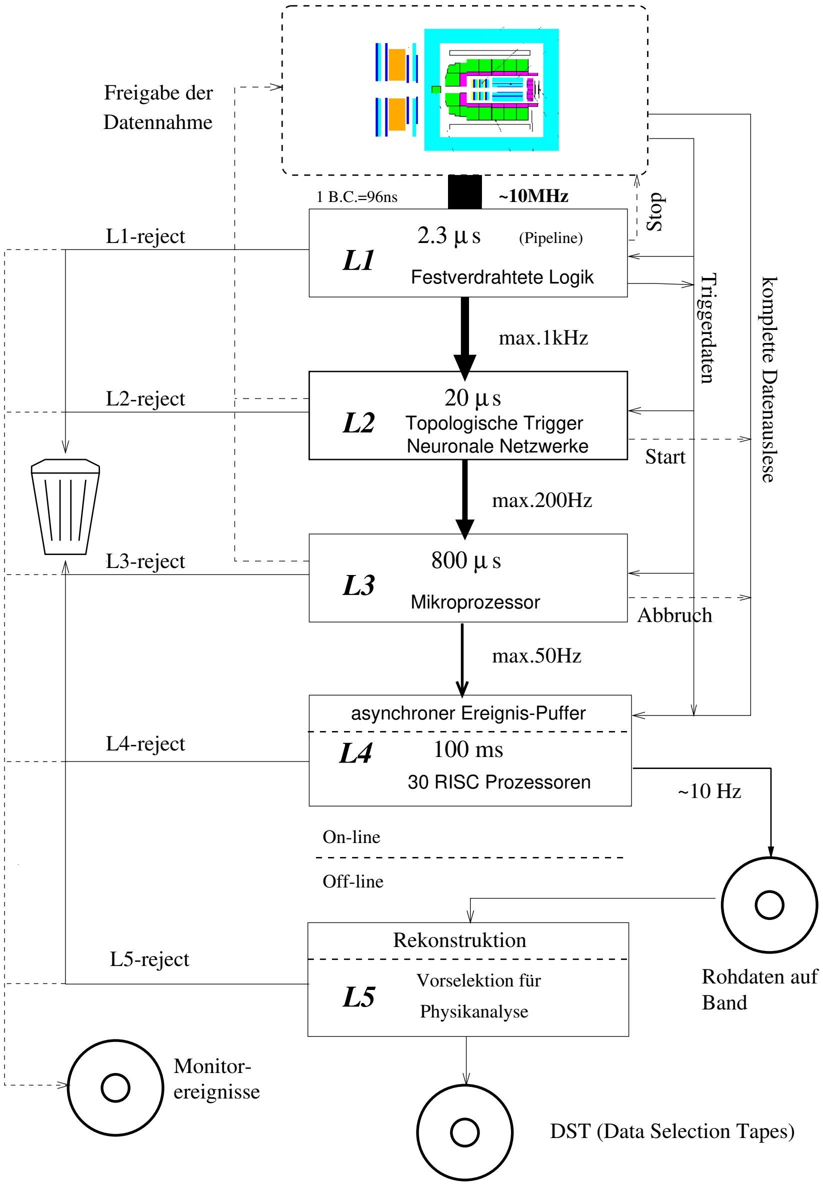


Abbildung 2.6: *Prinzipielle Gestaltung des H1-Triggersystems; eine Beschreibung relevanter Teile der Graphik erfolgt im Text*

stattgefunden hat oder nicht. Das Ziel des Triggers ist dabei, zum einen die Untergrundrate zu senken, und zum anderen häufige Ereignisklassen von seltenen zu trennen. Dieses geschieht auf vier Stufen, die hintereinandergeschaltet immer mehr Informationen aus verschiedenen Detektorkomponenten kombinieren.

2.3.1 Triggerstufe 1 (L 1)

Der ersten Triggerstufe stehen 2,3 μs für eine Entscheidung zur Verfügung. In dieser Zeit werden aus den zu einem BC vorliegenden Informationen der Detektorkomponenten einfache Größen gebildet, wie z.B. Energiesummen in den Kalorimetern oder die Summe der Einträge in den Spurkammern. Dieses geschieht durch eine fest verdrahtete Elektronik. Überschreitet eine der Größen einen fest eingestellten Schwellenwert, so wird das Bit des zugehörige Triggerelementes „gesetzt“. Die zentrale Triggerlogik CTL bildet aus den Triggerelementen der Detektorkomponenten logische Verknüpfungen, die vorläufigen Subtrigger. Ergibt mindestens eine der logischen Verknüpfungen das Setzen eines Subtriggers, so sendet die CTL ein Signal. Durch dieses Signal wird die Auslese der einzelnen Detektorkomponenten vorbereitet. Aufgrund des hohen Zeitaufwandes der Auslese, z.B. 4,1 ms für die Auslese aller Zellen des LAr-Kalorimeters [18], wird diese erst gestartet, wenn ein Ereignis auch die Triggerstufe 2 passiert.

2.3.2 Triggerstufe 2 (L 2)

Während die Auslese eines Ereignisses von den einzelnen Detektorkomponenten vorbereitet wird, läuft parallel eine weitere Analyse der Triggerinformationen. Dieser Stufe (L 2) stehen 20 μs zur Verfügung, was eine genauere Untersuchung der Topologie des Ereignisses ermöglicht, das auf L 1 akzeptiert wurde. Auf L2 sind derzeit zwei Typen von Triggern im Einsatz. Den ersten bildet ein topologischer Trigger [19, 20], der anhand der räumlichen Verteilung von Triggergrößen versucht, Charakteristika physikalischer Prozesse im untersuchten Ereignis zu finden. Als zweites sind neuronale Netzwerke zur Mustererkennung im Einsatz [21]. Stellt die zweite Triggerstufe fest, daß ein von L 1 akzeptiertes Ereignis doch nur Untergrund ist, wird dieses verworfen und die Datennahme direkt freigegeben. Die Totzeit des Detektors wird hierdurch entscheidend verkürzt.

2.3.3 Triggerstufen 3 und 4 (L 3, L 4)

Die Triggerstufe 3 ist derzeit noch nicht im Einsatz. Es ist auf L 3 ein System von RISC Prozessoren vorgesehen, dem neben den Triggerinformationen auch schon Daten der Auslese zu Verfügung stehen.

Die vierte Triggerstufe besteht aus 30 parallel arbeitenden Prozessoren. Es erfolgt von L 4 bereits eine weitgehende Rekonstruktion der Ereignisse, um die Entscheidung präziser treffen zu können. Auch werden Trigger-Entscheidungen, die auf L 1 getroffen wurden, anhand der rekonstruierten Daten überprüft. Wird bei der Überprüfung festgestellt, daß das ausgelesene Ereignis doch nur Untergrund ist, so wird dieses verworfen. Andernfalls werden die Daten der einzelnen Detektorkomponenten gespeichert.

2.4 Das elektronische System des LAr-Kalorimeters

Abbildung 2.7 zeigt den ersten Teil der Signalauslese des LAr-Kalorimeters. Die Symbole R_{HRC} und C_{HRC} bezeichnen dabei den Widerstand sowie die Kapazität der HRC-Beschichtung der HV-Platten. Treten geladene Teilchen im LAr-Kalorimeter in den Bereich zwischen HV- und Ausleseplatte, so ionisieren sie dort das flüssige Argon. Durch die über den Widerstand R_{HRC} anliegende Spannung werden die gebildeten, freien Elektronen wie in einer Ionisationskammer bewegt. Die Driftgeschwindigkeit der Elektronen hängt dabei stark von der Verunreinigung des Argons ab. Beimengungen molekularer Gase verändern die Elektronenenergie. Da der Steuquerschnitt für Elektronen stark von der Elektronenenergie abhängig ist, wird somit auch die Driftgeschwindigkeit beeinflußt [22]. Die gebildeten Ionen bewegen sich im flüssigen Argon so langsam, daß die durch ihre Bewegung auf den Ausleseplatten influenzierte Ladung vernachlässigbar klein ist.

Die durch die Bewegung der Elektronen in den Auslesezellen C_D influenzierte Ladung [23] wird als Signal weiterverarbeitet. Das influenzierte Signal wird über ein 10 m langes Kabel[6] zur zugehörigen Analogkarte (ANCD) geleitet. In einer Analogkarte sind dabei die Auslesekanäle von 16 Auslesezellen zusammengefaßt. Die Analogkarten befinden sich in Analogboxen (ANBX). Dabei sind die Analogkarten so zusammengefaßt, daß in einer Analogbox die Signale von räumlich zusammenliegenden Auslesezellen bearbeitet werden.

In den Analogkarten erfolgt eine erste Verstärkung und Formung der Signale aus den Auslesezellen. Abbildung 2.7 zeigt, daß das Signal zunächst an einer Glimmlampe L und einem Transistor T_P vorbei über einen Vorwiderstand R_S geleitet wird. Diese Bauteile dienen dazu, die weitere Ausleseelektronik vor Schäden durch Hochspannungsüberschläge zu schützen. Danach werden die ankommenden Signale werden in einem Vorverstärker verstärkt, von dem in Abbildung 2.7 nur der Eingangstransistor $JFET$[7] gezeigt ist.

Das verstärkte Signal wird zur weiteren Bearbeitung aufgeteilt. Ein Teil des Signals wird

---

[6] Um gleiche Signallaufzeiten zu erhalten, ist die Länge der Kabel für alle Zellen gleich

[7] engl. junction field effect transistor - Sperrschicht-Feldeffekt-Transistor

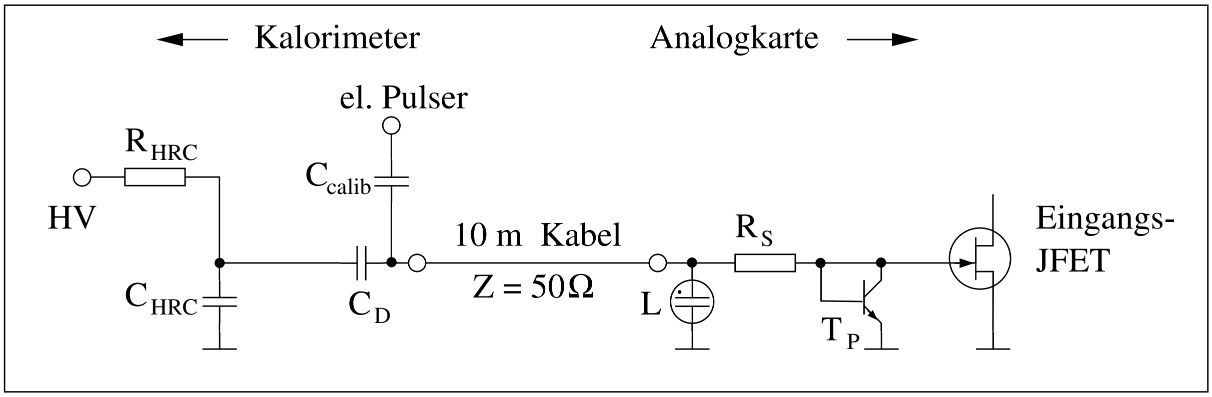


Abbildung 2.7: *Schematischer Aufbau des ersten Teils der Signalauslese des LAr-Kalorimeters; die Symbole werden im Text erklärt*

im Triggerzweig verarbeitet, an dessen Ende die Triggerelemente des LAr-Kalorimeters gebildet werden. Der Rest des Signals wird zur genauen Bestimmung der in den Auslesezellen influenzierten Ladung verwendet.

Aufbau und Zweck der elektronischen Pulser, deren Signale über die Koppelkapazität C_{Calib} in die Auslesekette eingespeist werden, sind unter Punkt 2.4.3 genauer behandelt.

2.4.1 Der Triggerzweig

Im Triggerzweig kommt es es darauf an, möglichst schnell die Informationen bereitzustellen, die auf der ersten Triggerstufe (s. Abschn. 2.3.1) benötigt werden. Hierzu werden die Signale aller Auslesezellen zu wenigen Größen zusammengefaßt. Unter anderem wird die gesamte gemessene Energie innerhalb der Kalorimeterteile CB, FB, FE und FH bestimmt.

Abbildung 2.8 zeigt den Weg, welchen das Signal vor dem Bilden der Triggerelemente durchläuft. Der Signalverlauf beginnt dabei links unten an den Auslesezellen (LAr-cell) und endet rechts oben bei den Triggerelementen (trigger elements). Es soll an dieser Stelle nur genauer auf den Signalverlauf im Analogteil des Triggerzweiges eingegangen werden, da der Rest für das weitere Verständnis der Arbeit nicht benötigt wird. Für weitergehende Informationen sei auf [13, 24] verwiesen.

Noch auf der ANCD[8] werden die Signale mehrerer Auslesezellen zu sogenannten Triggerzellen (TCs) summiert. Dabei werden in elektromagnetischen Sektionen die Signale von je 16 Auslesezellen zu einer Triggerzelle zusammengefaßt. Im weiteren werden diese Triggerzellen als ,,elektromagnetische Triggerzellen“ bezeichnet. TCs in hadronischen Sektionen des LAr-Kalorimeters bestehen aus der Summe der Signale von 4 Auslesezellen. Diese Triggerzellen werden im weiteren als ,,hadronische Triggerzellen“ bezeichnet.

Die TC-Signale werden zu Trigger-Merging-Boards (TMB) weitergeleitet, in denen die Signale der TCs zu Triggertürmen (TT) kombiniert werden. TTs werden dabei so gruppiert, daß ein vom Wechselwirkungspunkt kommendes Teilchen seine Energie in möglichst wenigen TTs deponiert. Aus diesem Grund sind die TTs sternförmig mit Orientierung auf den nominellen Wechselwirkungspunkt angeordnet.

Die Signale der TCs werden weiter zu ,,Shaping and Summing“-Modulen (SSM) geleitet. In diesen erfolgt eine Filterverstärkung mit kurzer Differentiationszeit ($\tau = 0{,}5\,\mu$s). Ebenso besteht in den SSMs die Möglichkeit, die Signale einzelner Triggerzellen zu verzögern. Durch diese Verzögerung kann erreicht werden, daß die Signalmaxima aller TCs eines TTs gleichzeitig auftreten. Die SSMs bieten ebenso die Möglichkeit Triggerzellen auszublenden, die als unbrauchbar bekannt sind. Die nicht ausgeblendeten TC-Signale werden zu TTs aufsummiert.

In den Analog-Gating-Modulen (AGMs) werden die Signalhöhen der TTs mit eingestellten Schwellenwerten verglichen. Es werden nur TT-Signale weitergeleitet, welche den zugehörigen Schwellenwert passieren. Diese Signale werden in Big-Tower-Summing-Units (BTS) zu Big Towers (BTs) summiert, die aus bis zu vier TTs bestehen. Hierbei werden

---

[8] In Abbildung 2.8 werden Analogkarten als Teile der Analogboxen (ANBX) nicht genauer spezifiziert.

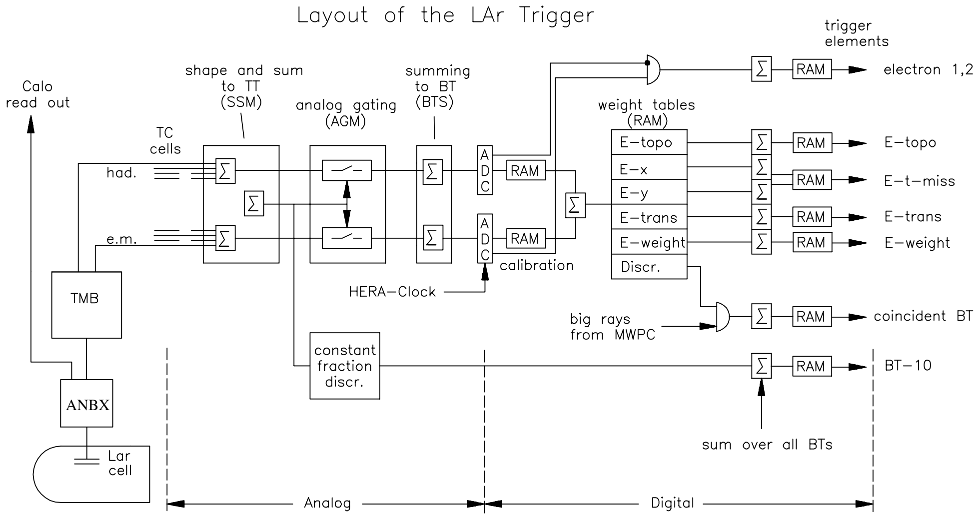


Abbildung 2.8: *Prinzipskizze des Triggerzweiges der Auslese des LAr-Kalorimeters*

elektromagnetische und hadronische Signale getrennt behandelt. Bei der Summierung der BTs wird darauf geachtet, daß ein vom Wechselwirkungspunkt kommendes Teilchen die Energie in möglichst wenigen BTs deponiert. Die BT-Signale werden in schnellen Analog-Digital-Wandlern (FADCs[9]) synchron zum HERA-Zeittakt digitalisiert.

Die digitalisierten Signale werden zu Triggerelementen kombiniert, die auf L 1 verarbeitet werden (s. Abschn. 2.3.1).

2.4.2 Die Auslesekette

Während im Triggerzweig die Signale der Auslesezellen verarbeitet werden, um schnell die Triggerelemente des LAr-Kalorimeters bilden zu können, erfolgt im Auslesezweig [9, 18, 25–27] eine erste Signalaufbereitung. Die Steuerung der Auslese erfolgt dabei durch den Front-End-Sequencer.

Der prinzipielle Aufbau des Auslesezweiges des LAr-Kalorimeters ist in Abbildung 2.9 dargestellt. Das Signal aus den Auslesezellen wird hinter dem Vorverstärker durch zwei

---

[9] engl. flash analog-digital-converter

Abbildung 2.9: *Prinzipskizze des Auslesezweiges im LAr-Kalorimeter*

passive Hochpässe sowie drei aktive Tiefpaßbereiche gefiltert und bipolar geformt. Die Zeitkonstante der Signalformung ist dabei, um Rauschen klein zu halten (s. Formel 4.3), mit $2{,}4\,\mu s$ im Auslesezweig deutlich größer als im Triggerzweig. Die elektronische Anordnung der Hoch- und Tiefpässe wird als Signalformer (Shaper) bezeichnet. Hinter dem Shaper wird das Signal auf eine Sample-and-Hold-Stufe (S-H-Stufe) gegeben. Bei einer positiven Entscheidung auf L 1 (s. Absch. 2.3.1) wird vom Front-End-Sequencer ein Puls zu der S-H-Stufe gesandt, welcher das Halten der aktuellen Signalhöhe bewirkt. Ist die Entscheidung auf L 2 (s. Abschn. 2.3.2) positiv, so wird die Auslese der auf der S-H-Stufe gehaltenen Signale vom Front-End-Sequencer gestartet.

Zunächst werden dabei die Signale der 16 Kanäle einer Analogkarte durch einen Multiplexer auf die Übersetzerkarte (Translator Board) geleitet. Auf dieser Karte werden die Signale der acht Analogkarten einer Analogbox (ANBX) durch einen weiteren Multiplexer geleitet. Danach wird jedes der Signale in zwei gleiche Teile aufgespalten, die um unterschiedliche Faktoren verstärkt werden. In den meisten Fällen erfolgt eine Verstärkung der Signale um die Faktoren 4 und 1. In einigen Bereichen des CB3E und FB1E wird anstelle von 4 nur ein Verstärkungsfaktor von 2 angewandt [28]. Durch die Auslese der Signale mit zwei unterschiedlichen Verstärkungen kann der dynamische Bereich für Signale auf 14 Bit, bei einer Verwendung von 12 Bit Analog-Digital-Konvertern (ADC), ausgeweitet werden. Die Wahl zweier unterschiedlicher Signalverstärkungen wird in einigen Regionen des vorwärtigen Kalorimeters benötigt, in denen in manchen Ereignissen extrem hohe Energien in den Auslesezellen deponiert werden. In diesen Bereichen wird nach der Aus-

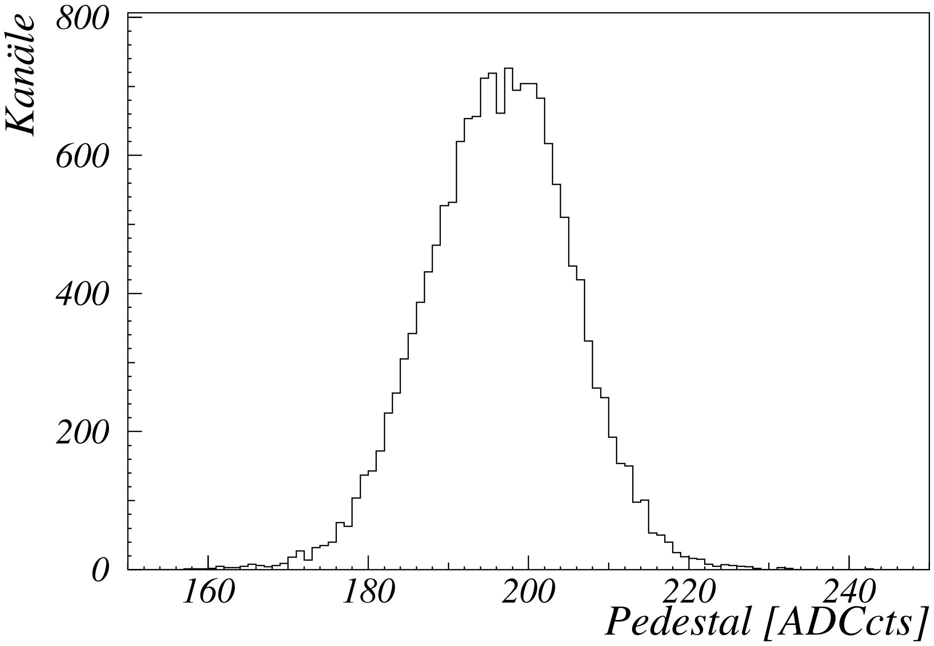


Abbildung 2.10: *Verteilung der Ladungssockelwerte (Pedestal) für alle Auslesekanäle des CB*

lese je nach der Signalhöhe das um den Faktor 4 verstärkte Signal oder das unverstärkte Signal gespeichert. Durch die unterschiedlichen Verstärkungen wird in diesen Bereichen des Kalorimeters eine feine Abstufung der registrierten Signale bei der notwendigen Größe des dynamischen Bereiches der Auslesekanäle ermöglicht. Beide Teile des Signals werden zur analogen Empfängereinheit (ANRU) weitergeleitet.

In der ANRU werden die differenziellen Signale von bis zu vier Analogboxen gleichgerichtet und danach über eine weitere S-H-Stufe und einen Verstärker zum zugehörigen ADC weitergeleitet. Abhängig von der Position im LAr-Kalorimeter, an der sich die Auslesezelle befindet, welcher das Signal entstammt, werden beide auf der Übersetzerkarte erzeugten Signale oder nur eines zum Digitalisieren gegeben. Bei den Signalhöhen, die im CB[10] auftreten, ist der dynamische Bereich von 12 Bit der ADCs genügend groß [29]. Daher wird bei Auslesekanälen des CB stets nur das um den Faktor 2 bzw. 4 verstärkte Signal zu den ADCs weitergeleitet und das unverstärkte Signal verworfen. Es werden durch die teilweise erfolgende Auslese der Signale von Auslesezellen mit zwei unterschiedlichen Verstärkungen pro Ereignis 63488 elektronische Kanäle bei 44352 vorhandenen Auslesezellen bearbeitet.

Durch einen Spannungsteiler am ADC-Eingang eines jeden Kanals wird dem von einer ANRU kommenden Signal ein Ladungssockelwert (Pedestal) überlagert. In Abbil-

---

[10] Das CB umfaßt die Räder BBE, CB1, CB2 und CB3

dung 2.10 ist die Höhe der Pedestals für den Bereich des CB aufgetragen[11]. Es ist zu erkennen, daß dem Signal eine Ladung überlagert wird, die ca. 200 Einheiten (ADCcts) des Analog-Digital-Konverters entspricht. Die Einführung von Pedestals ist notwendig, um bei kleinen Signalhöhen eine lineare Energiemessung zu erhalten. Durch das elektronische Rauschen der Ausleseelektronik wird dem Signal einer Auslesezelle stets eine Gaußförmig verteilte Ladung überlagert. Bei kleinen Signalen, die aus einer Auslesezelle stammen, kann es vorkommen, daß effektiv ein ‚negatives' Signal bei der Überlagerung mit dem Rauschen resultiert. Um das Gesamtsignal korrekt zu messen, ist es notwendig, auch ‚negative Signale' erfassen zu können. Ohne ein Pedestal wäre dieses nicht möglich. Es würden in dem Fall bei jedem negativen Signal 0 ADCcts registriert. Eine Signalerhöhung durch Rauschen ist andererseits stets meßbar. Daher käme es ohne Pedestal zu einer Nichtlinearisierung der Energieskala bei kleinen Signalen.

Die digitalisierten Signale werden von den ADCs in einen First-In-First-Out-Speicher (FIFO) gegeben und parallel zur Digitalisierung des Signals im folgenden Kanal zum digitalen Signalprozessor (DSP) weitergeleitet. Die DSPs sind vom Typ MOTOROLA DSP56001. Durch spezielle Hardware-Implementierung sind sie in der Lage, Operationen wie z.B. $y = ax + b$ mit der Eingabe x und den gespeicherten Koeffizienten a und b in extrem kurzer Zeit durchzuführen. Während der Datennahme geschieht in den DSPs simultan zur Datenerfassung eine Rekonstruktion der in den Auslesezellen influenzierten Ladungen anhand der digitalen Signale der ADCs.

2.4.3 Das Pulsersystem des LAr-Kalorimeters

Zur Kalibration und zu Testzwecken der Ausleseelektronik des LAr-Kalorimeters ist ein Pulsersystem [30] eingerichtet. Als Pulser dienen 16-Bit Digital-Analog-Konverter (DACs) mit einer Maximalamplitude von 1,035 Volt. Es ist möglich, sowohl die Länge der Pulse[12] als auch den Zeitpunkt, zu dem der Puls erfolgt, zu variieren. Intern sind die 16-Bit DACs aus zwei DACs zusammengesetzt, wobei durch einen der Pulsanteil der oberen 8 Bits und durch den anderen der Pulsanteil der unteren 8 Bits erzeugt wird [31].

Die Spannungspulse werden über Koppelkondensatoren mit einer Kapazität von 47 pF in die Ausleseelektronik des LAr-Kalorimeters eingespeist (s. Abb. 2.7). Die durch die Spannungspulse in die Auslesezellen injizierten Ladungen sind in ihrer Form mit denen vergleichbar, die durch Influenz in den Auslesezellen entstehen. Daher ist es mit den Pulsgeneratoren möglich, das Ansprechverhalten der Ausleseelektronik auf Ladungen zu simulieren, die bei physikalischen Ereignissen in den Auslesezellen influenziert werden.

Die bei den Pulsgeneratoren mögliche Quantelung der injizierten Ladungswerte beträgt 0,742 fC = 1 DACct (Digital-Analog-Konverter-Einheit), die absolute Genauigkeit der injizierten Ladung ist 0,1 % [9].

In Abbildung 2.9 ist zu erkennen, daß die Spannungspulse an zwei Stellen in die Ausleseelektronik eingespeist werden können. Geschieht die Einkopplung in unmittelbarer Nähe

---

[11] Zur Messung der Pedestals s. Kapitel 3

[12] Ist derzeit auf 20 μs eingestellt

der Vorverstärker, so wird von „warmer“ Kalibration gesprochen. Wird der Puls an den Auslesezellen im Kryostaten eingekoppelt, wird dieses als „kalte“ Kalibration bezeichnet. Warme und kalte Kalibration werden mit unterschiedlichen Sätzen von Pulsgeneratoren durchgeführt. In der warmen Kalibration ist dabei ein Pulsgenerator mit der Hälfte der Auslesekanäle in einer ANBX verbunden. In der kalten Kalibration ist ein Pulsgenerator nie mit mehr als einen Auslesekanal auf einer ANCD verbunden. Hierdurch ist es möglich, Studien zum Übersprechverhalten zwischen einzelnen Auslesekanälen durchzuführen.

Allgemein ist ein Zusammenhang zwischen der an einem DAC eingestellten Pulshöhe P_{DAC} und der in die Auslesezellen injizierten Ladung Q_{Puls} denkbar, der die folgende Form hat:

$$Q_{Puls} = Genoff + C_{DAC2Q}(P_{DAC}) \cdot P_{DAC} \tag{2.1}$$

mit:

Q_{Puls} $\hat{=}$ In die Auslesezellen injizierte Ladung [pC]
$Genoff$ $\hat{=}$ Generator-Offset [pC]
$C_{DAC2Q}(P_{DAC})$ $\hat{=}$ Koeffizient des Zusammenhangs zwischen DACcts und Ladung $[\frac{pC}{DACcts}]$
P_{DAC} $\hat{=}$ Eingestellte Pulshöhe [DACcts]

$C_{DAC2Q}(P_{DAC})$ beschreibt den Gradienten des Zusammenhangs von Q_{Puls} und P_{DAC}. Dieser Gradient kann durch Fehler der Pulsgeneratoren auch von der Pulshöhe P_{DAC} abhängen. $Genoff$ bezeichnet einen möglichen Ladungsoffset des Pulsgenerators.

Generator-Offsets

Bei einem idealen Pulsgenerator ist zu erwarten, daß $Genoff = 0$ ist. In der Signalauslese wird in diesem Fall nicht bemerkt, ob ein Puls mit der Höhe 0 in die Ausleseelektronik eingespeist wurde oder kein Puls erfolgt ist.

Die in der Kalibration verwendeten Pulsgeneratoren zeigen nicht dieses ideale Verhalten. Es werden vielmehr deutlich unterschiedliche Signale von den ADCs registriert, wenn einerseits die Pulsgeneratoren einen Puls der Höhe 0 in die Auslesezellen injizieren und wenn andererseits kein Puls erfolgt. Der Unterschied in den registierten Signalen ist darauf zurückzuführen, daß der eingestellten Pulshöhe stets ein Spannungs-Offset überlagert ist, der vom Pulsgenerator abhängt.

Abbildung 2.11 zeigt die Verteilung der Generator-Offsets $Genoff$ für die im CB verwendeten Pulsgeneratoren der kalten Kalibration. $Genoff$ wird bei der Kalibration der Auslese des LAr-Kalorimeters berücksichtigt (s. Kap. 3).

Linearität der Pulsgeneratoren

Bei idealen Pulsgeneratoren ist zu erwarten, daß der Koeffizient C_{DAC2Q} (s. Formel 2.1) unabhängig von P_{DAC} ist.

In diesem Abschnitt wird die Größe $\frac{\Delta S_{ADC}}{\Delta Q_{Puls}}$ untersucht. Dabei bezeichnet $\Delta S_{ADC} = S_{ADC}(Q_{Puls_1}) - S_{ADC}(Q_{Puls_2})$ den Zuwachs an registriertem Signal S_{ADC} in den ADCs, wenn der Ladungspuls der Pulsgeneratoren um $\Delta Q_{Puls} = Q_{Puls}(P_{DAC_1}) - Q_{Puls}(P_{DAC_2})$ erhöht wird. Die Einheit von S_{ADC} wird dabei $ADCcts$ genannt. Um die Auslesekanäle in denen das Signal unterschiedlich verstärkt wird, miteinander vergleichen zu können, wird als Einheit von $\frac{\Delta S_{ADC}}{\Delta Q_{Puls}}$ die Größe $\overline{\left(\frac{\Delta S_{ADC}}{\Delta Q_{Puls}}\right)}$ eines jeden Auslesekanals gewählt. $\overline{\left(\frac{\Delta S_{ADC}}{\Delta Q_{Puls}}\right)}$ bezeichnet dabei den Mittelwert von $\left(\frac{\Delta S_{ADC}}{\Delta Q_{Puls}}\right)$, innerhalb des Intervalls von Q(100 DACcts) und Q(15460 DACcts). In Abbildung 2.12 ist jeweils der Mittelwert von $\frac{\Delta S_{ADC}}{\Delta Q_{Puls}}$ in einer der drei betrachteten Sektionen des Kalorimeters aufgetragen. Die Fehler der Datenpunkte sind kleiner als die gewählten Symbole.

Es ist zu erkennen, daß $\frac{\Delta S_{ADC}}{\Delta \mathrm{Q}_{\mathrm{Puls}}}$ bei verschiedenen Werten von Q_{Puls} unterschiedlich groß ist. Das Anwachsen von $\frac{\Delta S_{ADC}}{\Delta Q_{Puls}}$ im betrachteten Pulsbereich kann dabei, wie in Kapitel 3 noch angesprochen wird, den Eigenschaften der Ausleseelektronik zugerechnet werden. Es ist jedoch ein kontinuierliches Anwachsen von $\frac{\Delta S_{ADC}}{\Delta Q_{Puls}}$ zu erwarten. Der tendenzielle Abfall von $\frac{\Delta S_{ADC}}{\Delta Q_{Puls}}$ im Bereich zwischen 3000 DACcts und 6000 DACcts sowie die Schwankungen bei Pulshöhen unterhalb von 2000 DACcts lassen sich nicht durch Effekte der Ausleseelektronik erklären. Diese beiden Effekte deuten vielmehr darauf hin, daß in den unterschiedlichen Intervallen von Q_{Puls} unterschiedlich große Zuwächse an Ladung in die Auslesezellen injiziert werden. Es ist daher anzunehmen, daß C_{DAC2Q} leicht von Q_{Puls} abhängig ist. Die konkrete Fehlerquelle, die zu diesem Effekt führt, konnte bislang noch nicht festgestellt werden.

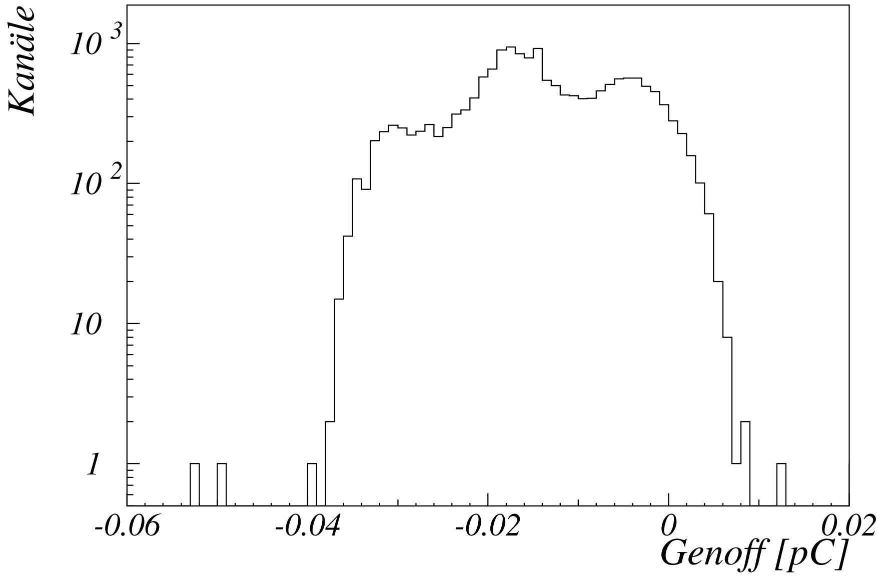


Abbildung 2.11: *Generator-Offset $Genoff$ der Pulsgeneratoren für die kalte Kalibration im Bereich des CB*

Abbildung 2.13 zeigt $\frac{\Delta S_{ADC}}{\Delta Q_{Puls}}$ bei größerer Auflösung im Bereich von $Q_{Puls} \leq 280\,DACcts$. Auch bei dieser Abbildung sind die Fehler der Datenpunkte kleiner als die gewählten Symbole. Neben den kleineren Schwankungen von $\frac{\Delta S_{ADC}}{\Delta Q_{Puls}}$ in der Größe von 3 % treten in regelmäßigen Abständen anomal kleine Werte von $\frac{\Delta S_{ADC}}{\Delta Q_{Puls}}$ auf. Dieses ist z.B. in Abbildung 2.13 bei 130 DACcts zu sehen. Als Erklärung für diese Schwankung sind wie schon in Abbildung 2.12 Effekte der Ausleseelektronik auszuschließen, da in diesem Fall eine kontinuierliche Änderungen von $\frac{\Delta S_{ADC}}{\Delta Q_{Puls}}$ in einer Richtung auftreten sollten. Es ist daher anzunehmen, daß das C_{DAC2Q} der Pulsgeneratoren in kurzen Intervallen von P_{DAC} stark um einen Mittelwert $\overline{C}_{DAC2Q}$ schwankt. Bei niedriger Auflösung, was implizit einer Mittelung über einen größeres Intervall von P_{DAC} entspricht, werden daher weniger stark ausgeprägte Schwankungen bemerkt als bei hohen Auflösungen.

Die deutlich verringerten Werte von $\frac{\Delta S_{ADC}}{\Delta Q_{Puls}}$ bei einer Pulshöhe von ca. 130 DACcts sind auf die interne Struktur der Pulser zurückzuführen [31]. Zu Beginn dieses Abschnitts wird erwähnt, daß die 16-Bit Pulsgeneratoren aus zwei 8-Bit Pulsgeneratoren zusammengesetzt sind. Die Werte von C_{DAC2Q} dieser beiden Pulsgeneratoren sind leicht unterschiedlich. Es gilt dabei $C_{DAC2Q_{oben}} < 2^8 \cdot C_{DAC2Q_{unten}}$, wobei $C_{DAC2Q_{oben}}$ den Zusammenhang zwischen $DACcts$ und Pulshöhe für den DAC der oberen 8 Bits und $C_{DAC2Q_{unten}}$ entsprechend den Zusammenhang für den DAC der unteren 8 Bits darstellt. Daher werden in dem Fall, daß sich der Ladungswert ändert, der durch den Pulsgenerator der oberen 8 Bits

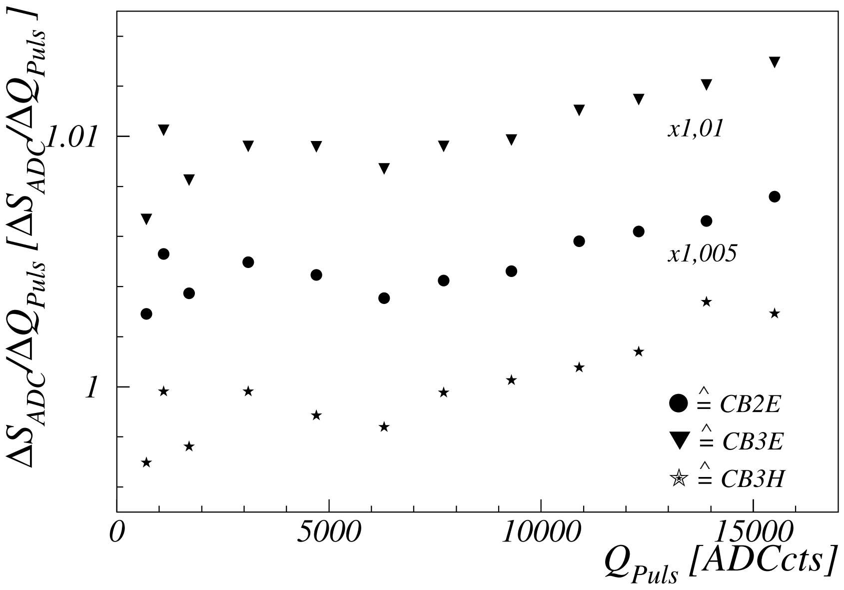


Abbildung 2.12: *Gradient* $\frac{\Delta S_{ADC}}{\Delta Q_{Puls}}$ *des Zusammenhangs zwischen dem registriertem Signal* S_{ADC} *und injizierter Ladung* Q_{Puls} *in Abhängigkeit von* Q_{Puls} *der Pulsgeneratoren; es ist der Mittelwert von* $\frac{\Delta S_{ADC}}{\Delta Q_{Puls}}$ *in den Sektionen CB2E (●), CB3E (▼) und CB3H (★) aufgetragen*

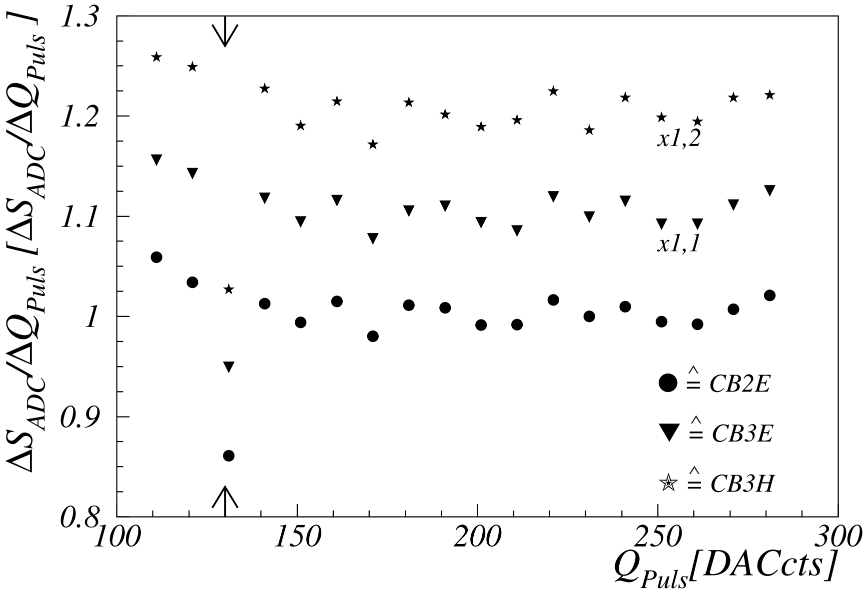


Abbildung 2.13: *Gradient* $\frac{\Delta S_{ADC}}{\Delta Q_{Puls}}$ *des Zusammenhangs von registriertem Signal* S_{ADC} *und injizierter Ladung* Q_{Puls} *bei einer hohen Auflösung in Abhängigkeit von* Q_{Puls}*; es ist der Mittelwert von* $\frac{\Delta S_{ADC}}{\Delta Q_{Puls}}$ *in den Sektionen CB2E (●), CB3E (▼) und CB3H (★) aufgetragen; die Bedeutung des Pfeiles bei* $Q_{Puls} = 103\,DACcts$ *ist im Text erklärt*

injiziert wird, anomal niedrige Werte von $\frac{\Delta S_{ADC}}{\Delta Q_{Puls}}$ gemessen. Die Werte von P_{DAC} bei der sich die Pulsladung des DACs ändert, der für die oberen 8 Bits zuständig ist, werden im folgenden als „Bitflips“ bezeichnet. Der Abstand zweier Bitflips beträgt konstant $2^8 = 256\,$DACcts. Das erste Auftreten hängt vom Typ des Pulsgenerators ab und tritt bei 128 bzw. 166 DACcts auf.

Gradient des Zusammenhangs von Q_{Puls} und P_{DAC}

Für den Fall idealer Pulsgeneratoren ist zu erwarten, daß der Wert von $\overline{C}_{DAC2Q}$ für alle Pulsgeneratoren gleich ist.

Die in der Kalibration des LAr-Kalorimeters verwendeten Pulsgeneratoren sind durch Bauteilunterschiede jedoch leicht unterschiedlich. Daraus resultieren leicht unterschiedliche Werte von $\overline{C}_{Q2DAC}$. Es ist daher bei H1 üblich, die Ladung, die von den Pulsgeneratorne in die Auslesezellen injiziert wird, folgendermaßen zu berechnen:

$$Q_{Puls} = Genoff + C_{lin} \cdot C^{*}_{DAC2Q} \cdot P_{DAC} \tag{2.2}$$

mit:

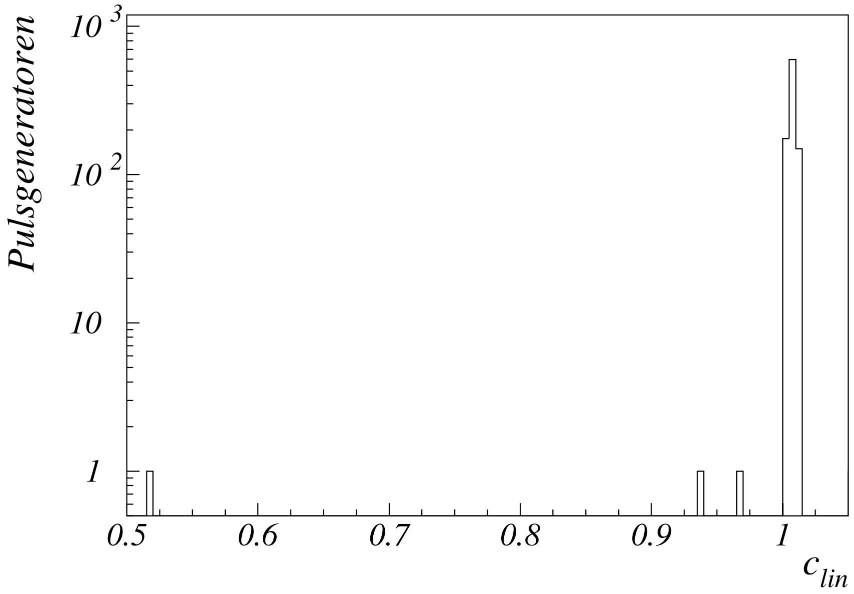


Abbildung 2.14: *Korrekturfaktoren C_{lin} der Generatoren der kalten Kalibration zum Ausgleich der unterschiedlicher Gradienten $\overline{C}_{DAC2Q}$*

Q_{Puls} $\hat{=}$ In die Auslesezellen injizierte Ladung [pC]
$Genoff$ $\hat{=}$ Generator-Offset [pC]
C_{lin} $\hat{=}$ Faktor zum Ausgleich der unterschiedlichen Werte von C_{DAC2Q} bei unterschiedlichen Pulsgeneratoren
C^*_{DAC2Q} $\hat{=}$ Wert von $\overline{C}_{DAC2Q}$ bei einem idealen Pulsgenerator $[\frac{pC}{DACcts}]$
P_{DAC} $\hat{=}$ Pulshöhe [DACcts]

Die Faktoren C_{lin} sind dabei ein Maß für die Abweichung der Pulsladung, die bei einem realen Pulsgenerator 1 DACct entspricht, von der eines hypothetischen, idealen Pulsgenerators.

Abbildung 2.14 zeigt die Korrektur-Faktoren C_{lin} der Pulsgeneratoren der kalten Kalibration. Für die meisten Pulsgeneratoren treten Korrekturen weit unter einem Prozent auf. Nur bei drei Generatoren muß eine große Korrektur angewandt werden.

Um Änderungen im Verhalten der Generatoren zu berücksichtigen, werden die Faktoren C_{lin} in regelmäßigen Abständen neu bestimmt.

Kapitel 3

Untersuchungen zur Ladungsrekonstruktion

3.1 Grundlagen

Wie in Kapitel 1 angesprochen, sind physikalische Aussagen bei H1 durch die Genauigkeit begrenzt, mit welcher der Streuprozeß von Elektronen und Protonen rekonstruiert werden kann. Ein wesentlicher Punkt ist dabei die Genauigkeit, mit welcher der Zusammenhang zwischen der deponierten Energie der Teilchen im LAr-Kalorimeter und dem registrierten Signal bekannt ist. Die Bestimmung dieses Zusammenhanges wird allgemein als Kalibration bezeichnet. Ein wesentlicher Bestandteil der Kalibration ist die Bestimmung des funktionalen Zusammenhanges, der zwischen den digitalen Signalen der ADCs und der in der Auslesezelle influenzierten Ladung (Signal-Ladungs-Zusammenhang) besteht. Da in dieser Arbeit nur der Aspekt des Signal-Ladungs-Zusammenhang betrachtet wird, wird im folgenden dieser Teilaspekt der Kalibration als „Kalibration" bezeichnet.

Um den Signal-Ladungs-Zusammenhang zu bestimmen, werden alle zwei bis vier Wochen mit Hilfe der Pulsgeneratoren (s. Absch. 2.4.3) für die kalte Kalibration Ladungspulse in die Auslesezellen injiziert und das Signal der ADCs gemessen. Das gleiche geschieht auch mit Hilfe der Generatoren der warmen Kalibration. In der kalten Kalibration wird dabei nur in jeweils eine Auslesezelle, die zu einer Analogkarte gehört, gleichzeitig ein Ladungspuls gegeben. Bei der Datennahme wird zur Rekonstruktion der influenzierten Ladung der aus der kalten Kalibration ermittelte Signal-Ladungs-Zusammenhang benutzt. Die kalte Kalibration wird gewählt, da in diesem Fall der Signalverlauf demjenigen in physikalischen Ereignissen entspricht (s. Abb 2.9). Im Fall der warmen Kalibration bewirken veränderte Signallaufzeiten und ein anderer Signalverlauf eine leichte Änderung der von den ADCs gemessenen Signale.

Aufgrund defekter Leitungen kann bei der kalten Kalibration aber nicht in alle Auslesezellen ein Signal eingekoppelt werden. Der in der Datennahme verwendete Signal-Ladungs-Zusammenhang wird für diese Auslesezellen durch eine Extrapolation des Signal-Ladungs-Zusammenhangs festgelegt, der in der warmen Kalibration bestimmt wird. Es hat sich gezeigt, daß das Verhältnis der in der warmen und in der kalten Kalibration gemessenen Signale als Polynom zweiten Grades in der Kapazität C_D der Auslesezellen dargestellt werden kann [32]. Die Extrapolationsfaktoren werden mit Hilfe der Auslesekanäle mit der Möglichkeit zur warmen und kalten Kalibration ermittelt. Zur Bestimmung der Extrapolationsfaktoren wird an die Größe

$$\frac{SLZ_{kalt}}{SLZ_{warm}} \tag{3.1}$$

mit:

SLZ_{warm} $\hat{=}$ Signal-Ladungs-Zusammenhang, der in der warmen Kalibration für einen Auslesekanal bestimmt wird
SLZ_{kalt} $\hat{=}$ Signal-Ladungs-Zusammenhang, der in der kalten Kalibration für einen Auslesekanal bestimmt wird

ein Polynom 2. Grades in C_D angepaßt. Die Koeffizienten des angepaßten Polynoms werden dann als Extrapolationskoeffizienten verwendet. Um dem im Detail unterschiedlichen Aufbau der Module verschiedener Räder [9] Rechnung zu tragen, werden insgesamt 10 Koeffizentensätze bestimmt.

3.1.1 Die Kalibrationsrampen

Um den Signal-Ladungs-Zusammenhang aller Auslesekanäle zu bestimmen, werden in die Auslesezellen 22 unterschiedlich große Ladungen zwischen 0,074 pC und 18,3 pC[1] injiziert. Dieses Verfahren wird im folgenden als ,,Pulsrampe“ bezeichnet. Bei einer Pulsrampe werden bei jedem Ladungswert nacheinander 100 Ladungspulse in die Auslesezellen injiziert. Die jeweils von den ADCs gemessenen Signale S_{ADC} werden in den DSPs linear LIN und quadratisch SQR summiert:

$$LIN = \sum_{i=1}^{N} S_{ADC} \tag{3.2}$$

$$SQR = \sum_{i=1}^{N} S_{ADC}^2 \tag{3.3}$$

mit:

S_{ADC} $\hat{=}$ In den ADCs gemessenes Signal
N $= 100 \hat{=}$ Anzahl der Punkte der Pulsrampe

Aus beiden Summen wird während der Kalibration noch in den DSPs mit Hilfe der Formeln 3.4 und 3.5 das mittlere registrierte Signal $\overline{S}_{ADC}$ sowie die Standardabweichung RMS des Signalhöhenspektrums berechnet:

$$\overline{S}_{ADC} = \frac{\mathrm{LIN}}{N} \tag{3.4}$$

$$\mathrm{RMS} = \sqrt{\frac{N}{N-1} \cdot \left(\frac{\mathrm{SQR}}{N} - \left[\frac{\mathrm{LIN}}{N} \right]^2 \right)} \tag{3.5}$$

---

[1] Entspricht ca. 0,3 GeV - 76 GeV

mit:

$\overline{S}_{ADC}$ $\hat{=}$ mittleres registriertes Signal bei einem Ladungswert
RMS $\hat{=}$ Standardabweichung der Signalhöhenverteilung
LIN $\hat{=}$ lineare Summe der registrierten Signale bei einem Ladungswert
SQR $\hat{=}$ quadratische Summe der registrierten Signale bei einem Ladungswert
N $= 100 \hat{=}$ Anzahl der Pulse bei einem Ladungswert

Durch die Mittelung über 100 Meßwerte wird der Einfluß des Rauschens auf $\overline{S}_{ADC}$ verringert.

In Abbildung 3.1 ist der Zusammenhang zwischen der in einer Auslesezelle injizierten Ladung Q_{Puls} und $\overline{S}_{ADC}$ für einen Kanal der Verstärkung 4 auf der Übersetzerkarte dargestellt. Zu erkennen ist der nahezu lineare Zusammenhang zwischen $\overline{S}_{ADC}$ und Q_{Puls} bis zu einer Pulshöhe von ca. 13 pC. Bei höheren Werten von Q_{Puls} ergeben sich für den in Abbildung 3.1 betrachteten Auslesekanal keine weiteren Informationen, da der zugehörige ADC in Sättigung geht. Die bei der Signalauslese des LAr-Kalorimeters verwendeten ADCs gehen bei $(2^{12} - 1)\, ADCcts = 4095\, ADCcts$ in Sättigung. In Abschnitt 2.4.2 wird angesprochen, daß in einigen Bereichen des vorwärtigen Kalorimeters dieser dynamische Ladungsbereich nicht ausreicht. Um den dynamischen Bereich der Kanäle mit einer Verstärkung von 2 bzw. 1 auf den Übersetzerkarten möglichst weit durch Ladungspulse zu erfassen, werden Ladungspulse mit $Q_{Puls} > 13\, pC$ benötigt.

Neben dem Zusammenhang zwischen Q_{Puls} und $\overline{S}_{ADC}$ wird in der Kalibration das in jedem Kanal registrierte Signal bestimmt, das gemessen wird, wenn keine Ladung in die Auslesezellen injiziert wird. Der Mittelwert des so gemessenen Signals entspricht dem Pedestal Ped (s. Abschn. 2.4.2), das als Signalnullpunkt in die Ladungsrekonstruktion eingeht (s. Formel 3.6).

3.1.2 Parametrisierung des Zusammenhangs zwischen registriertem Signal und deponierter Energie

Bestimmung des Signal-Ladungs-Zusammenhangs

Abbildung 3.1 zeigt, daß die verwendete Ausleseelektronik im gesamten sensitiven Bereich weitgehend linear ist. Die leichten Abweichungen von der Linearität können mit Hilfe eines Polynoms 3. Grades gut beschrieben werden [13]:

$$Q_{Puls} = \sum_{i=1}^{3} (\overline{S}_{ADC} - Ped)^i \cdot P_i \tag{3.6}$$

mit:

Q_{Puls} $\hat{=}$ in die Auslesezellen injizierte Ladung
$\overline{S}_{ADC}$ $\hat{=}$ mittleres vom ADC gemessene Signalhöhe
Ped $\hat{=}$ Ladungssockelwert (Pedestal)
P_i $\hat{=}$ Koeffizienten des angepaßten Polynoms zur Beschreibung des Signal-Ladungs-Zusammenhangs

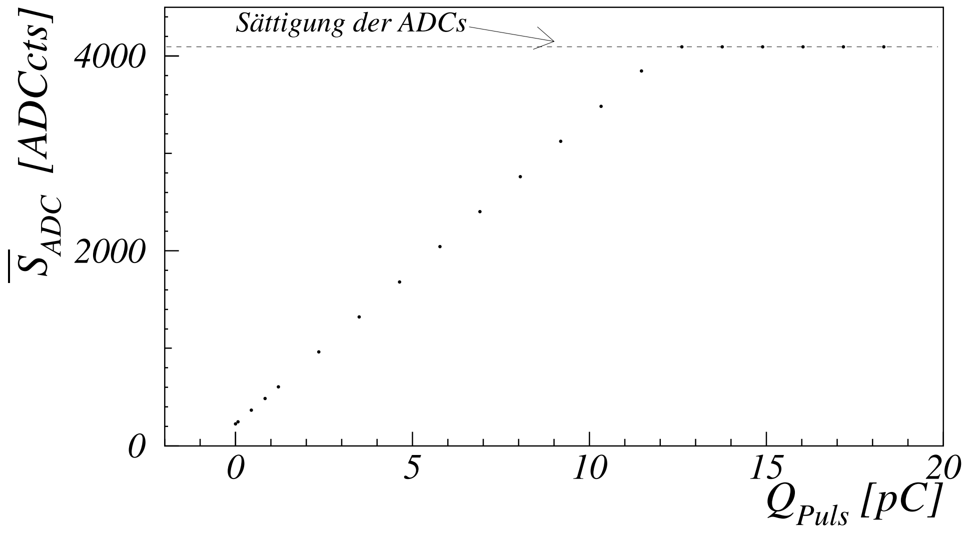


Abbildung 3.1: *Zusammenhang zwischen dem gemessenen Signal $\overline{S}_{ADC}$ und der in die Auslesezellen injizierten Ladung Q_{Puls} für einen sich typisch verhaltenden Auslesekanal mit der Verstärkung 4 auf der Übersetzerkarte; die überlagerte Linie bei einer Signalhöhe von 4095 ADCcts entspricht dem Signal, daß bei Sättigung der ADCs gemessen wird*

Die Bestimmung der Parameter P_i ist in das Kalibrationsprogramm integriert und erfolgt jeweils nach Beendigung der Pulsrampe. Mit Hilfe der Parameter P_i erfolgt bei der Datennahme noch in den DSPs die Berechnung der in den Auslesezellen influenzierten Ladung Q_{inf}. Um systematische Fehler bei der Ladungsrekonstruktion zu vermeiden, ist eine möglichst perfekte Parametrisierung des Zusammenhangs zwischen Q_{Puls} und $\overline{S}_{ADC}$ notwendig. Zur Erinnerung sei erwähnt, daß in der Kalibration davon ausgegangen wird, daß die folgende Beziehung gilt:

$$\overline{S}_{ADC}(Q_{Puls}) = \overline{S}_{ADC}(Q_{inf}) \tag{3.7}$$

unter der Bedingung, daß $Q_{Puls} = Q_{inf}$ ist.

Wenngleich eine perfekte Parametrisierung des Zusammenhangs von Q_{Puls} und $\overline{S}_{ADC}$ gewünscht wird, sollen doch unnötig häufige Änderungen der gespeicherten Werte von P_i und *Ped* verhindert werden. Zu diesem Zweck sind an einigen Stellen des Programms zur Parametrisierung des Signal-Ladungs-Zusammenhangs Schwellenwerte eingeführt.

Im folgenden werden die wichtigsten Bestandteile der Parameteranpassungsfunktion dargestellt [33]. Größen, die in einer früheren Kalibration bestimmt wurden und bei der

Parameteranpassung aktuell sind, erhalten dabei den Index „alt“, wie z.B. Ped_{alt} als Bezeichnung für den aktuell gültigen Pedestalwert. Größen, die aus den Daten der aktuellen Kalibration bestimmt werden, erhalten den Index „neu“:

- Es wird das aktuell gültige Pedestal Ped_{alt} mit Ped_{neu} verglichen. Für den Fall, daß $|Ped_{alt} - Ped_{neu}| > 0,1\,ADCcts$ ist[2], wird das neu bestimmte Pedestal Ped_{neu} in die DSPs gespeichert und Ped_{alt} verworfen. Die 0,1 ADCcts entsprechen dabei der durch Rauschen hervorgerufenen statistischen Unsicherheit des Pedestals eines Auslesekanals dessen zugehörige Auslesezelle eine hohe Kapazität C_D hat (s. Kap. 4).
- Als Maß für die Güte der aktuellen Parameter $P_{i_{alt}}$ wird die Größe

$$\begin{align} F_{alt} &= \sqrt{\frac{\sum\limits_{i=1}^{N}\left(\frac{\Delta Q_i}{Q_{Puls_i}}\right)^2}{N-1}} \notag \\ &= \sqrt{\frac{\sum\limits_{i=1}^{N}\left(\frac{(Q_{Puls_i} - \sum\limits_{j=1}^{3} P_{j_{alt}} \cdot (\overline{S}_{ADC_i} - Ped)^j}{Q_{Puls_i}}\right)^2}{N-1}} \tag{3.8} \\ & \tag{3.9} \end{align}$$

mit:
F ≙ quadratisch gemittelte, relative Abweichung der rekonstruierten Ladung
Q_{Puls_i} ≙ Pulsladung am Punkt i der Kalibrationsrampe;
die drei kleinsten injizierten Ladungen sind
$Q_{Puls_1} \approx 74\,fC$, $Q_{Puls_2} \approx 454\,fC$ und $Q_{Puls_3} \approx 834\,fC$
ΔQ_i ≙ Differenz zwischen der in die Auslesezelle injizierten und der
aus dem registrierten Signal rekonstruierten Ladung am Punkt i
der Kalibrationsrampe
P_j ≙ Koeffizienten des Polynoms zur Ladungsrekonstruktion (s. Formel 3.6)
$\overline{S}_{ADC_i}$ ≙ mittleres am Punkt i der Pulsrampe von den ADCs gemessenes Signal
Ped ≙ Pedestal des Auslesekanals
N ≙ Anzahl der Signal-Ladungs-Paare, an welche das Polynom
angepaßt wird[3]

berechnet. Dabei werden nur Pulsladungen Q_{Puls_i} in der Summation verwendet, bei denen der ADC des Auslesekanals noch nicht in Sättigung ist. Da für $i > 1$ der Quotient $\frac{\Delta Q_i}{Q_{Puls_i}} << 1$ ist, kann F_{alt} folgendermaßen angenähert werden:

$$F \approx \sqrt{\frac{\left(\frac{\Delta Q_{Puls_1}}{Q_{Puls_1}}\right)^2}{N-1}} \tag{3.10}$$

---

[2] Der Wert ist variabel, angegeben ist der gebräuchliche Schwellenwert

[3] Pulshöhen bei denen der ADC des betrachteten Kanals in Sättigung ist, werden nicht berücksichtigt

Ist das berechnete $F_{alt} > 3‰$, so wird an die in der aktuellen Kalibration bestimmten Wertepaare von Q_{Puls} und $\overline{S}_{ADC}$ ein Polynom 3. Grades angepaßt. Hierbei werden die Wertepaare berücksichtigt, bei denen der ADC des betrachteten Auslesekanals noch nicht in Sättigung ist. Die Koeffizienten des Polynoms entsprechen den Parametern P_i in Formel 3.6.

- Damit die Parameter $P_{i_{alt}}$ gegen die neu bestimmten Parameter $P_{i_{neu}}$ ausgetauscht werden, müssen zwei Bedingungen erfüllt sein:
  1. Es muß $F_{neu} < 0,95 \cdot F_{alt}$ sein.
  2. Der Wert χ^2/dof der Anpassung des Polynoms muß kleiner als 20 sein.

Es ist zu erkennen, daß das Maß für die Güte des aktuellen Parametersatzes F_{alt} Probleme bereiten kann. Bei den angenommenen 14 Wertepaaren von Q_{Puls} und $\overline{S}_{ADC}$ an die das Polynom angepaßt wird, kann $\frac{\Delta Q_1}{Q_1} \approx 1\,\%$ betragen, ohne daß neue Parameter bestimmt werden (s. Formel 3.10).

Bestimmung des Energie-Ladungs-Zusammenhangs

In Testmessungen wurde der Zusammenhang zwischen der in einer Auslesezelle deponierten Energie E_{dep} und der in der Auslesezelle influenzierten Ladung für alle Sektionen des LAr-Kalorimeters bestimmt (s. z.B. [34, 35]). Allgemein gilt für E_{dep}:

$$\begin{aligned} E_{dep} &= C_{Q2E} \cdot C_{korr} \cdot Q_{inf} \\ &= C_{Q2E} \cdot C_{korr} \cdot \sum_{i=1}^{3} (S_{ADC} - Ped)^i \cdot \mathrm{P_i} \end{aligned} \tag{3.11}$$

mit:

E_{dep} $\hat{=}$ in der Auslesezelle deponierte Energie
C_{Q2E} $\hat{=}$ Kalibrationsfaktor für die Umrechnung von Ladung in Energie (modulabhängig)
C_{korr} $\hat{=}$ Faktor, der die durch Argon-Verunreinigungen verringerte Ladungssammlungseffizienz ausgleicht (global)
für den Rest der Variablen s. Formel 3.6

Der Faktor C_{Q2E} berücksichtigt dabei die Baugrößen der einzelnen Kalorimeter-Module, der zweite Faktor C_{korr} korrigiert global für das gesamte LAr-Kalorimeter die Verunreinigung des verwendeten Argons. Diese Korrektur ist notwendig, da Verunreinigungen des Argons die Ladungssammlungseffizienz verringern [36]. Wärend C_{Q2E} nur einmal zu Beginn des H1-Experimentes zu bestimmen war, ist die Reinheit des Argons im LAr-Kalorimeter nicht konstant [37]. Um den Wert von C_{korr} aktuell zu halten, werden daher in regelmäßigen Abständen Untersuchungen zur Bestimmung der Ladungssammlungseffizienz durchgeführt [37–39].

Aus der Beschreibung des Kalibrationsprozesses ergeben sich einige Fragestellungen zur Güte der Kalibration:

1. Wie gut ist die zeitliche Konstanz des Signal-Ladungs-Zusammenhangs? Eine direkte Konsequenz der Antwort ist, inwieweit Kalibrationen sinnvoll möglich sind.
2. Wie gut wird der Signal-Ladungs-Zusammenhang im Bereich kleiner Ladungen durch das Polynom 3. Grades beschrieben? Eine gute Beschreibung des Signal-Ladungs-Zusammenhangs bei kleinen Ladungen ist wichtig, da in den meisten Auslesezellen, die in physikalischen Ereignissen ein Signal enthalten, Ladungen influenziert sind, die kleiner als die Pulsladung am zweiten Punkt der Pulsrampe[4] sind. Die Ladungsrekonstruktion bei kleinen Ladungen ist dabei besonders empfindlich auf Fehler bei der Bestimmung des Pedestals. Ebenso kann es durch den langen Hebelarm der hohen Pulsladungen bei der Anpassung der Parameter P_i vorkommen, daß das Ansprechverhalten der Ausleseelektronik auf kleine Ladungen nicht ideal beschrieben wird.
3. Führt die Extrapolation der Parameter P'_i aus der warmen Kalibration für die Kanäle ohne Möglichkeit zur kalten Kalibration zu einer korrekten Bestimmung der Parameter P_i?

In den folgenden Abschnitten werden die Fragestellungen behandelt.

3.2 Zeitliche Stabilität der Kalibration

Die Voraussetzung für einen stabilen Detektorbetrieb ist eine gute zeitliche Stabilität der Pedestals sowie der Parameter P_i. Im Fall starker Schwankungen sind entweder Kalibrationen mit inakzeptabel großer Häufigkeit notwendig, oder die Unsicherheit der rekonstruierten Ladung fällt groß aus.

Wie in Abbildung 3.2 zu sehen ist, ist der Beitrag der nicht-linearen Terme in Formel 3.6 zur Ladungsrekonstruktion kleiner als 0,2 %. Die Schwankung des Signal-Ladungs-Zusammenhangs kann somit in guter Näherung mit der Schwankung des linearen Terms $P_1 \cdot (S_{ADC} - Ped)$ im Polynom der Ladungsrekonstruktion (s. Formel 3.6) gleichgesetzt werden. Schwankungen der Pedestals wirken sich hauptsächlich auf die Ladungsrekonstruktion bei kleinen Signalen aus, da dort der Term $S_{ADC} - Ped$ noch klein ist. Veränderungen von P_1 bewirken hingegen im gesamten dynamischen Bereich eines Auslesekanals gleich große relative Fehler.

Bestimmung der zeitlichen Stabilität von P_1

Zur Untersuchung der zeitlichen Stabilität von P_1 werden 6 Kalibrationen aus 6 Monaten herangezogen. Als Maß für die zeitliche Stabilität dient dabei die Größe

$$\overline{\left(\frac{\Delta P_1}{P_1}\right)} = \frac{1}{5} \cdot \sum_{i=2}^{6} \frac{|P_{1_i} - P_{1_{i-1}}|}{P_{1_i}} \tag{3.12}$$

---

[4] Die injizierte Ladung Q_{Puls} am zweiten Punkt der Pulsrampe ist größer als 1,6 GeV

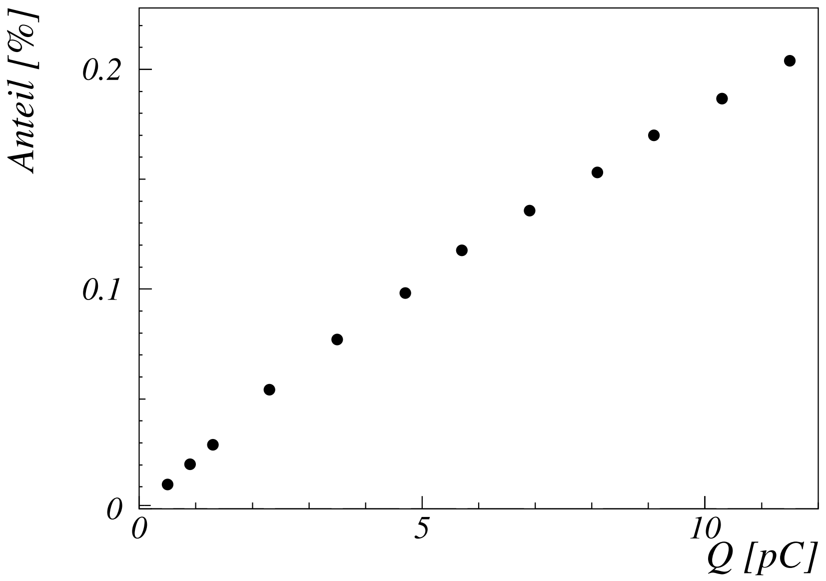


Abbildung 3.2: *Beitrag der nicht-linearen Terme in Formel 3.6 zur Ladungsrekonstruktion (s. Formel 3.6)*

$|P_{1_i} - P_{1_{i-1}}|$ beschreibt dabei die Änderung von P_1 zwischen zwei aufeinander folgenden Kalibrationen.

In Abbildung 3.3 ist $\overline{\left(\frac{\Delta P_1}{P_1}\right)}$ für alle Auslesekanäle des CBs aufgetragen. Es ist zu erkennen, daß bei fast allen Kanälen $\overline{\left(\frac{\Delta P_1}{P_1}\right)}$ kleiner als 0,5 % ist. Der Mittelwert beträgt dabei 0,57 ‰. Unter der Annahme, daß sich P_1 zwischen zwei Kalibrationen gleichmäßig ändert, kann der mittlere Fehler von Q_{inf}, der durch die Änderung des Wertes von P_1 auftritt auf $\frac{1}{2}\overline{\left(\frac{\Delta P_1}{P_1}\right)} = 0,29$ ‰abgeschätzt werden. Dieses ist vernachlässigbar klein.

Bei wenigen Kanälen in Abbildung 3.3 ist $\overline{\left(\frac{\Delta P_1}{P_1}\right)}$ größer als 0,5 %. Die meisten dieser Kanäle enthalten in der Kalibration die Pulsladungen von dem gleichen Pulsgenerator. Diese Kanäle sind als schattiertes Histogramm in Abbildung 3.3 hervorgehoben. Es ist anzunehmen, daß die auffällig hohen Werte von $\overline{\left(\frac{\Delta P_1}{P_1}\right)}$ darauf zurückzuführen ist, daß der Pulsgenerator defekt ist. Der Grund, aus dem noch einige andere Kanäle auffällig hohe Werte von $\overline{\left(\frac{\Delta P_1}{P_1}\right)}$ haben, ist bislang nicht bekannt.

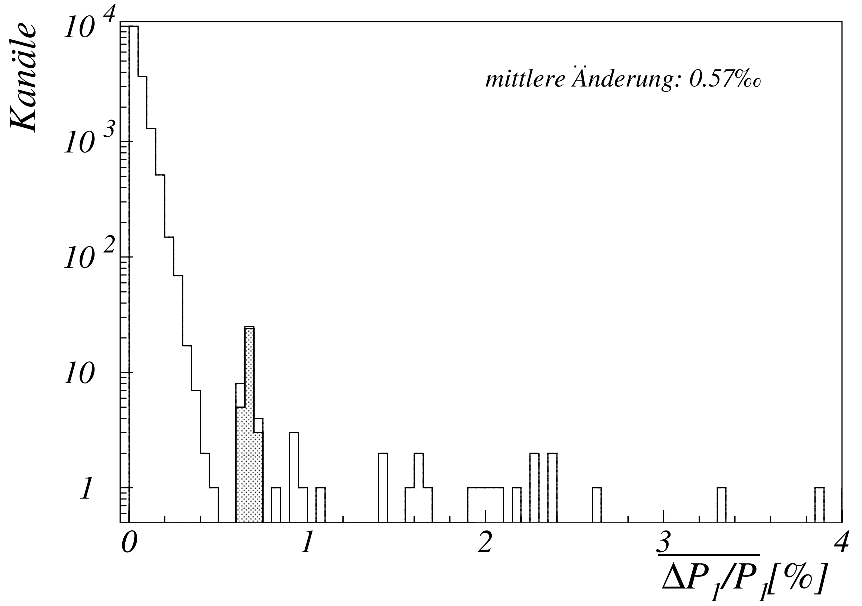


Abbildung 3.3: *Mittelwert* $\overline{\frac{\Delta P_1}{P_1}}$ *der Änderung des Parameters* P_1 *aus Formel 3.6 der Kanäle des CB innerhalb eines Monats normiert auf* P_1*; die Auslesezellen der schattiert hervorgehobenen Auslesekanäle sind mit einem offensichtlich defekten Pulsgenerator der kalten Kalibration verbunden*

Bestimmung der zeitlichen Stabilität der Pedestals

Zur Untersuchung der zeitlichen Stabilität der Pedestals werden 6 Kalibrationen aus 6 Monaten herangezogen. Als Maß für die Stabilität der Pedestals wird dabei die Größe

$$\overline{\Delta Ped} = \frac{1}{5}\left(\sum_{i=2}^{6} |Ped_i - Ped_{i-1}|\right) \tag{3.13}$$

betrachtet. Die Untersuchung einer Größe $\overline{\left(\frac{\Delta Ped}{Ped}\right)}$ ist nicht sinnvoll, da das Pedestal den Signalnullpunkt darstellt. Die rekonstruierten Ladungen sind von der genauen Lage des Nullpunktes jedoch unabhängig.

In Abbildung 3.4 ist die Größe $\overline{\Delta Ped}$ für alle Auslesekanäle des CBs aufgetragen. Die mittlere Änderung liegt mit ca. $8,3 \cdot 10^{-2}$ ADCcts unterhalb des Schwellenwerts bei dem ein neues Pedestal gespeichert wird (s. Abschn. 3.1.2). Eine Umrechnung der Werte von $\overline{\Delta Ped}$ in gemessene Energiedepositionen ergibt eine Änderung der gemessenen Energie zwischen zwei Kalibrationen von ca. 1,2 MeV in Auslesezellen der elektromagnetischen Sektionen sowie ca. 2,2 MeV in hadronischen Sektionen. Wird auch die Änderung der Pedestals zwischen zwei Kalibrationen als kontinuierlich angenommen, so sind mittlere Fehler der gemessenen Energien in einer Auslesezelle von 0,6 MeV bzw. 1,1 MeV zu erwarten. Der Fehler, der durch die zeitliche Schwankung der Pedestals auftritt, liegt bei

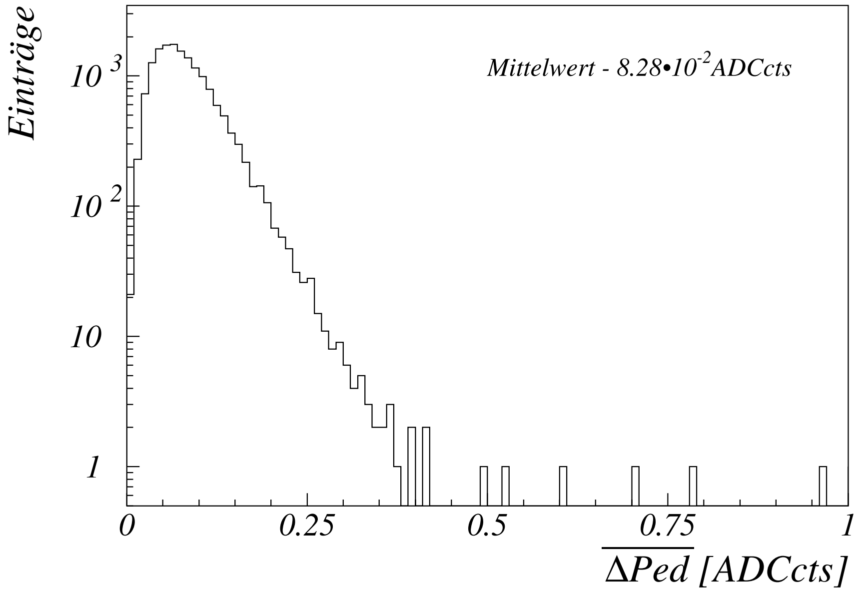


Abbildung 3.4: *Mittlere Änderung $\overline{\Delta Ped}$ der Pedestals der Auslesekanäle im Zeitraum eines Monats*

typisch auftretenden Energiedepositionen somit ca. eine Größenordnung oberhalb dem durch die Schwankung von P_1.

Es wird deutlich, daß bei Zeitintervallen von 2 Wochen bis zu einem Monat zwischen zwei Kalibrationen P_1 als konstant angenommen werden kann. Die Konstanz des Pedestals ist als gut zu bewerten. Sie ist bei der derzeitigen Genauigkeit der Energiemessung noch ausreichend, bei einer erhöhten Genauigkeit muß jedoch die Änderung der Pedestals in kürzeren Zeitintervallen korrigiert werden.

3.3 Ladungsrekonstruktion bei kleinen Signalen

Im vorherigen Abschnitt wurde untersucht, wie gut die in der Kalibration bestimmten Parameter zwischen zwei Kalibrationen als konstant angenommen werden können. In diesem Abschnitt wird untersucht, wie gut der Signal-Ladungs-Zusammenhang der Auslesekanäle durch die Parameter P_i beschreiben wird. Ein Maß für die Güte der Parametrisierung des Signal-Ladungs-Zusammenhangs ist die Größe $\frac{\Delta Q}{Q_{Puls}}$:

$$\frac{\Delta Q}{Q_{Puls}} = \frac{\sum_{i=1}^{3} (\overline{S}_{ADC} - Ped)^i \cdot P_i - Q_{\mathrm{Puls}}}{Q_{Puls}} \tag{3.14}$$

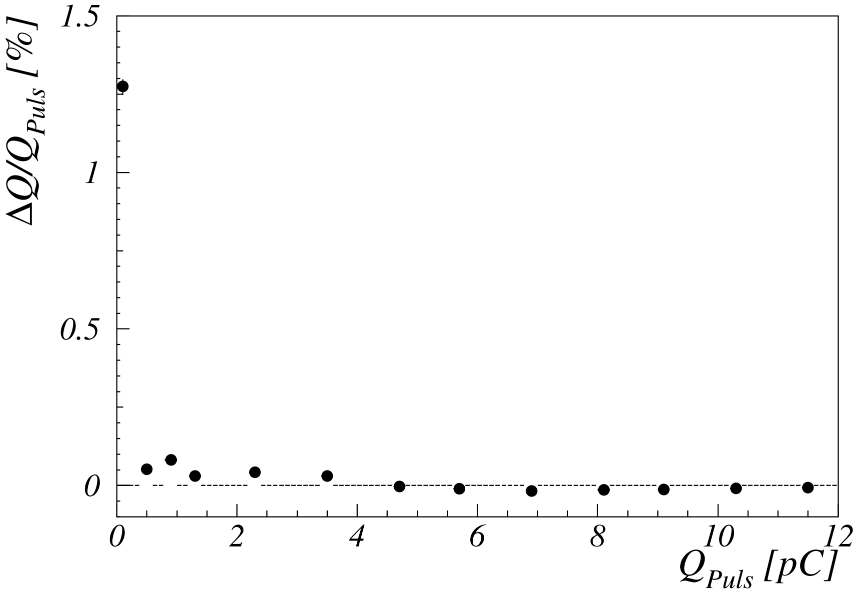


Abbildung 3.5: *Auf die Pulshöhe Q_{Puls} normierte Abweichung ΔQ der rekonstruierten Ladung von der Pulsladung, gemittelt über die Auslesekanäle der Sektionen CB2E, CB3E und CB3H*

$$= \frac{\sum_{i=1}^{3} (\overline{S}_{ADC} - Ped)^i \cdot P_i - (C_{lin} \cdot C^*_{DAC2Q} \cdot P_{DAC} + Genoff)}{Q_{Puls}} \qquad (3.15)$$

ΔQ $\hat{=}$ Differenz zwischen der in die Auslesezellen injizierten und der mit Hilfe von Formel 3.6 berechneten Ladung
$\overline{S}_{ADC}$ $\hat{=}$ mittleres vom ADC registriertes Signal
Ped $\hat{=}$ Pedestal des Auslesekanals
P_i $\hat{=}$ Koeffizienten des Polynoms zur Ladungsrekonstruktion (s. Formel 3.6)
Q_{Puls} $\hat{=}$ in die Auslesezellen injizierte Pulsladung
C_{lin} $\hat{=}$ Korrekturfaktor zum Ausgleich der unterschiedlichen Gradienten der Pulsgeneratoren (s. Punkt 2.4.3)
Genoff $\hat{=}$ Korrekturterm zum Ausgleich des Generator-Offsets (s. Punkt 2.4.3)
C^*_{DAC2Q} $\hat{=}$ Zusammenhang zwischen der gewählten Pulshöhe in *DACcts* und der Pulsladung in *pC* für einen idealen Pulsgenerator

Abbildung 3.5 zeigt die Größe $\frac{\Delta Q}{Q_{Puls}}$ in Abhängigkeit der Pulshöhe Q_{Puls}. ΔQ bezeichnet dabei die Abweichung der Pulsladung Q_{Puls} der Pulsgeneratoren von der mit Hilfe von Formel 3.6 rekonstruierten Ladung. Es sind dabei die über alle Auslesekanäle jeweils einer der Sektionen CB2E, CB3E und CB3H gemittelten Werte von $\frac{\Delta Q}{Q_{Puls}}$ aufgetragen.

Abbildung 3.5 zeigt, daß in mehr als 97 % des Bereichs der Pulsrampe $\frac{\Delta Q}{Q_{\text{Puls}}}$ kleiner als 1 ‰ist. Nur bei sehr kleinen Werten von Q_{Puls} ist eine signifikante Erhöhung von $\frac{\Delta Q}{Q_{\text{Puls}}}$ zu erkennen. Da in den meisten Auslesezellen, in denen in physikalischen Ereignissen Energie deponiert wird, die deponierte Energie solch kleinen influenzierten Ladungen entspricht [42], ist eine Verbesserung der Beschreibung des Signal-Ladungs-Zusammenhangs bei diesen kleinen Ladungen notwendig.

3.3.1 Probleme bei Untersuchungen im unteren Ladungsbereich

Unter Punkt 2.4.3 wurde angesprochenen, daß sich die Pulsgeneratoren nicht ideal verhalten. Dieses nicht-ideale Verhalten beschränkt die Möglichkeiten, die Parametrisierung des Signal-Ladungs-Zusammenhangs bei kleinen Signalen zu verbessern:

- Es wird in Abschnitt 2.4.3 angesprochen, daß die Pulsgeneratoren verschieden groß ausgeprägte Generator-Offsets $Genoff$ haben (s. Abb. 2.11). Werden die Pulsgeneratoren mit Werten von S_{DAC} angesprochen, so daß $C_{lin} \cdot C^{*}_{DAC2Q} \cdot S_{DAC} + Genoff < 0$ ist, ist die in die Auslesezellen injizierte Ladung Q_{Puls} nicht genau definiert. Es ist daher notwendig bei der Untersuchung Werte von S_{DAC} einzusetzen, bei denen $C_{lin} \cdot C^{*}_{DAC2Q} \cdot S_{DAC} + Genoff > 0$ ist.

  In Abbildung 2.11 ist zu erkennen, daß bei den meisten Pulsgeneratoren $Genoff > -44\,fC$ ist. Die Untersuchung beginnt daher bei eingestellten Werten von $S_{DAC} = 60\,DACcts$. Bei diesen Werten von S_{DAC} beträgt $C_{lin} \cdot C^{*}_{DAC2Q} \cdot S_{DAC} \approx 44\,fC$. Für Auslesezellen, die mit einem Pulsgenerator der kalten Kalibration verbunden sind, bei dem $Genoff \approx -44\,fC$ ist, entspricht die niedrigste untersuchte Ladung somit einer injizierten Ladung die nahezu 0 ist. Für Auslesekanäle dieser Auslesezellen kann dadurch der Signal-Ladungs-Zusammenhang bei sehr kleinen injizierten Ladungen untersucht werden.

  In die Auslesezellen, die mit einem Pulsgenerator verbunden sind, bei dem $Genoff \approx 0$ ist, werden bei der niedrigsten Pulsladung hingegen ca. 44 fC injiziert. Durch den Generator-Offset ist es somit für viele Auslesekanäle nicht möglich, den Signal-Ladungs-Zusammenhang bei sehr kleinen Ladungen zu untersuchen. Es kann in diesen Auslesezellen der Signal-Ladungs-Zusammenhang erst ab Ladungen untersucht werden, die in den Auslesezellen deponierten Energie von 180 MeV bis 340 MeV entsprechen. Der Energiebereich, der dem Ladungswert 44 fC entspricht, resultiert aus den unterschiedlich großen Faktoren C_{Q2E} (s. Formel 3.11) in unterschiedlichen Bereichen des LAr-Kalorimeters.

- In Abschnitt 2.4.3 wird angesprochen, daß an manchen Stellen der Pulsrampe der Gradient $\frac{\Delta S_{ADC}}{\Delta Q_{Puls}}$ zwischen zwei aufeinander folgenden DACcts deutlich kleiner ist als zwischen den anderen DACcts. Diese auffälligen Stellen werden als „Bitflips“ bezeichnet. Der Abstand zweier Bitflips beträgt konstant 256 DACcts.

  Ebenso wurde erwähnt, daß die Bitflips durch die unterschiedlich hohen Werte von $\overline{C}_{DAC2Q}$ der beiden DACs verursacht wird, die innerhalb des 16-Bit DACs jeweils für Ladungspulse zuständig sind, die den unteren bzw. oberen 8 Bits von P_{DAC} entsprechen.

Innerhalb der Kalibration des LAr-Kalorimeters werden die unterschiedlich hohen Werte von $\overline{C}_{DAC2Q}$ dadurch berücksichtigt, daß der Abstand zweier Punkte der Pulsrampe ein ganzzahliges Vielfaches von $2^8\,DACcts = 256\,DACcts$ ist. Durch diese Wahl der Abstände von S_{DAC} wird erreicht, daß die Pulsladung, die von dem DAC, der für die unteren 8 Bits zuständig ist, bei jedem Punkt der Pulsrampe gleich groß ist. Verändert werden nur die Pulsladungen, die von dem DAC generiert werden, der für die oberen 8 Bits zuständig ist.

Diese in der Kalibration getroffene Wahl für die Pulsrampe, muß auch bei der Untersuchung des Signal-Ladungs-Zusammenhangs bei kleinen Ladungen berücksichtigt werden. Untersucht wird daher der Signal-Ladungs-Zusammenhang im Intervall von $P_{DAC} = 60\,DACcts$ bis $P_{DAC} = (60 + 2^8)\,DACcts = 316\,DACcts$. Somit wird auch bei dieser Untersuchung die Pulsladung unverändert gelassen, die von dem DAC generiert wird, der für die unteren 8 Bits zuständig ist. Es wird nur die Pulsladung hinzugefügt, die einem Bit des Pulsgenerators der oberen 8 Bits entspricht. Der Wert von 316 DACcts entspricht dabei einer Pulsladung $C_{lin} \cdot C^*_{DAC2Q} \cdot 316$ DACcts. Diese Ladung entspricht der influenzierten Ladung bei einer Energiedeposition zwischen 950 MeV und 1,8 GeV in einer Auslesezelle. Der große Bereich an möglichen Energiedepositionen, die einer Ladung entsprechen, wird durch die unterschiedlichen Werte von C_{Q2E} in den unterschiedlichen Sektionen des LAr-Kalorimeters bewirkt.

3.3.2 Ergebnis der Studien bei kleinen Pulsladungen

An die Wertepaare von $\overline{S}_{DAC}$ und Q_{Puls} im Bereich zwischen 60 DACcts und 316 DACcts wurde für die einzelnen Auslesekanäle ein Polynom 1. Grades angepaßt. Der Gradient $P_{1_{LE}}$ des angepaßten Polynoms ist dabei mit dem Parameter P_1 aus Formel 3.6 vergleichbar, da der Beitrag der nicht-linearen Terme in Formel 3.6 bei den kleinen untersuchten Werten von Q_{Puls} vernachlässigbar ist (s. Abb. 3.2).

Als ein Maß für den Unterschied der beiden Parametrisierungen wird die Größe

$$\frac{\Delta P_1}{P_1} = \frac{P_{1_{LE}} - P_1}{P_1} \tag{3.16}$$

untersucht.

Abbildung 3.6 zeigt die Größe $\frac{\Delta P_1}{P_1}$ für die Auslesekanäle des FBs. Der Mittelwert der Verteilung liegt bei 0,64 %. Dieses bedeutet, daß $P_{1_{LE}}$ im Mittel größer als P_1 ist, oder umgekehrt formuliert, daß weniger Signal S_{ADC} bei gleicher injizierter Ladung Q_{Puls} registriert wird (s. Formel 3.6).

Diese Beobachtung ist konsistent mit den bereits in Abschnitt 2.4.3 geschilderten Beobachtungen. In Abbildung 2.12 ist zu erkennen, daß der Quotient $\frac{\Delta S_{ADC}}{\Delta Q_{Puls}}$ bei kleinen Pulsladungen niedriger ist als bei hohen. Dieses läßt sich dadurch erklären, daß der Verstärkungsfaktor der Transistorschaltungen in der Auslesekette an unterschiedlichen Punkten des dynamischen Bereiches [44] unterschiedlich groß ist.

Die Größe $\frac{\Delta P_1}{P_1}$ gibt den Unterschied wieder, der zwischen dem Gradienten des Signal-Ladungs-Zusammenhangs existiert, der in der Kalibration bestimmt wird und dem, der bei kleinen Ladungen bestimmt wird. In wenigen Auslesezellen werden in physikalischen Ereignissen mehr als 1 GeV Energie deponiert. Da der untersuchte Ladungsbereich bis mindestens 1 GeV deponierter Energie heraufreicht, kann $\frac{\Delta P_1}{P_1}$ mit dem Fehler gleichgesetzt werden, der in Analysen benutzte Energien derzeit aufgrund der unterschiedlichen Signal-Ladungs-Zusammenhänge haben.

Eine Berücksichtigung des Unterschiedes zwischen $P_{1_{LE}}$ und P_1 könnte in den Analysen bei H1 zu einer deutlichen Reduktion des systematischen Fehlers führen.

Im Rahmen dieser Arbeit wurde daher eine Korrekturfunktion entwickelt, die in der primären Energierekonstruktion bei H1 (H1REC) zum Einsatz kommen kann. In dieser Funktion werden die in der Datennahme gemessenen Ladungswerte, die unterhalb eines festgelegten Schwellenwertes liegen, durch Korrekturfaktoren auf den Unterschied des Signal-Ladungs-Zusammenhangs bei kleinen Ladungen korrigiert. Eine Überprüfung der Funktion in Analysen bei H1 steht noch aus. Es ist jedoch geplant diese Tests in naher Zukunft durchzuführen. Danach soll die Korrekturfunktion zusammen mit den Korrekturfaktoren für Analysen bei H1 zur Verfügung gestellt werden.

Als mögliche Weiterentwicklung der entwickelten Korrekturfunktion ist eine Funktion zu denken, die je nach der Höhe der gemessenen Ladung in den Auslesezellen des LAr-Kalorimeters einen unterschiedlichen Korrekturfaktor anwendet. Eine Entwicklung dieser Funktion sollte in Zukunft durchgeführt werden.

3.4 Untersuchungen zur Pedestalbestimmung

Neben den Parametern P_1 bis P_3, welche die Steigung des Signal-Ladungs-Zusammenhangs beschreiben, ist das Pedestal von großer Bedeutung für die Ladungsrekonstruktion (s. Formel 3.6). Wird das Pedestal falsch bestimmt, so ist eine Nichtlinearisierung der Energieskala die direkte Folge.

Im folgenden wird eine Untersuchung vorgestellt, in der überprüft wird, inwieweit die in der Kalibration bestimmten Pedestals Ped_{Kalib} mit jenen übereinstimmen, die unter Datennahmebedingungen Ped_{Run} vorliegen. Diese Untersuchung wird mit Hilfe von Rauschereignissen durchgeführt. Als ,,Rauschereignisse“ werden Datensätze mit Ereignissen (Runs) bezeichnet, in welchen die Auslese des Detektors zu einem zufälligen Zeitpunkt geschieht. Es werdne bei Rauschereignissen nicht wie bei anderen Runs vom Trigger (s. Absch. 2.3) Hinweise auf ein Physik-Ereignis für den Start der Auslese des Detektors gefordert. Daher wird bei der Auslese des LAr-Kalorimeters von den ADCs als einziges Signal das elektronische Rauschen der Auslesekanäle gemessen, wenn nicht zufällig die Auslese kurz nach einem Physik-Ereignis stattfindet. Diese Möglichkeit kann jedoch vernachlässigt werden. Das Rauschen der Auslesekanäle ist als ,,weißes Rauschen“ beschreibbar (s. Kap. 4). Dieses bedeutet unter anderem, daß in einem Auslesekanal im Mittel genauso viele Signale gemessen werden, die größer als das Pedestal sind, wie solche, die kleiner sind. Daher eignet sich das in Rauschereignissen im Mittel gemessene Signal als

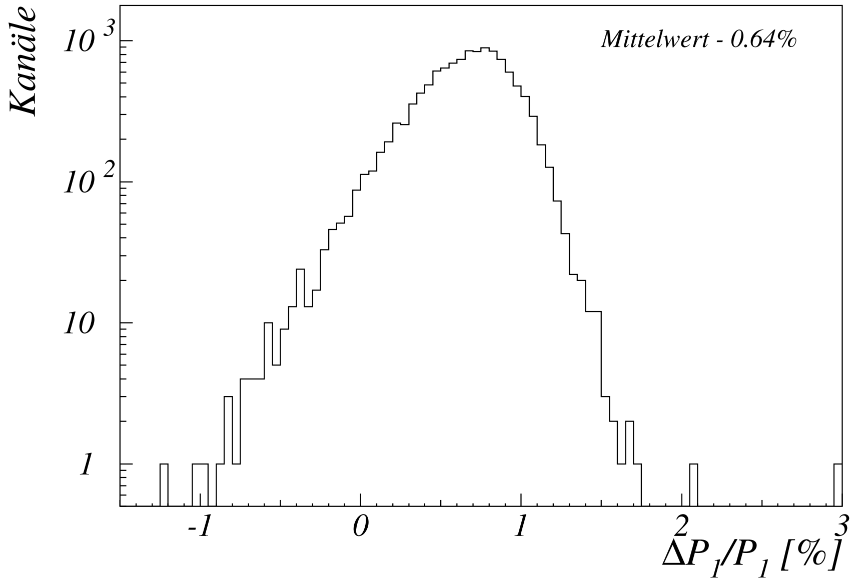


Abbildung 3.6: *Unterschied ΔP_1 zwischen dem in der Kalibration über den gesamten sensitiven Bereich und dem im Bereich kleiner Ladungen bestimmten Gradienten des Signal-Ladungs-Zusammenhangs, normiert auf P_1*

Meßgröße, um Unterschiede zwischen Ped_{Run} und Ped_{Kalib} zu bemerken. Aus Formel 3.11 ergibt sich für den Fall $S_{ADC} \approx Ped$ bei Vernachlässigung der nichtlinearen Terme:

$$E = C_{\mathrm{Q2E}} C_{\mathrm{korr}} \cdot (\mathrm{S_{ADC}} - \mathrm{Ped_{Kalib}}) \cdot P_1 \tag{3.17}$$

Bei der Untersuchung vieler Ereignisse folgt für den Mittelwert:

$$\begin{aligned} \overline{E} &= C_{\mathrm{Q2E}} C_{\mathrm{korr}} \cdot (\overline{\mathrm{S}}_{\mathrm{ADC}} - \mathrm{Ped_{Kalib}}) \cdot P_1 \\ &= C_{\mathrm{Q2E}} C_{\mathrm{korr}} \cdot (\mathrm{Ped_{Run}} - \mathrm{Ped_{Kalib}}) \cdot P_1 \\ &\overset{!}{=} 0 \end{aligned} \tag{3.18}$$

mit:

$E(\overline{E})$	$\hat{=}$ (mittlere) gemessene Energiedeposition in einer Auslesezelle
$C_{\mathrm{Q2E}}, C_{\mathrm{korr}}$	$\hat{=}$ Faktoren für die Umrechnungvon Ladung zu Energie
$S_{ADC}(\overline{S}_{ADC})$	$\hat{=}$ (mittleres) im ADC gemessenes Signal
Ped_{Kalib}	$\hat{=}$ in der Kalibration bestimmtes Pedestal eines Auslesekanals
Ped_{Run}	$\hat{=}$ in Rauschereignissen bestimmtes Pedestal eines Auslesekanals
P_1	$\hat{=}$ Koeffizient des linearen Terms der Ladungsrekonstruktion

Formel 3.18 ist zu entnehmen, daß wenn Ped_{Run} und Ped_{Kalib} in einem Auslesekanal gleich sind, eine mittlere Energie $\overline{E}$ von 0 gemessen wird.

Als Maß für den Unterschied zwischen Ped_{Run} und Ped_{Kalib} wird daher die Größe $\overline{E}$ untersucht. Die aus den Unsicherheiten von Ped_{Run} und Ped_{Kalib} resultierende Unsicher-

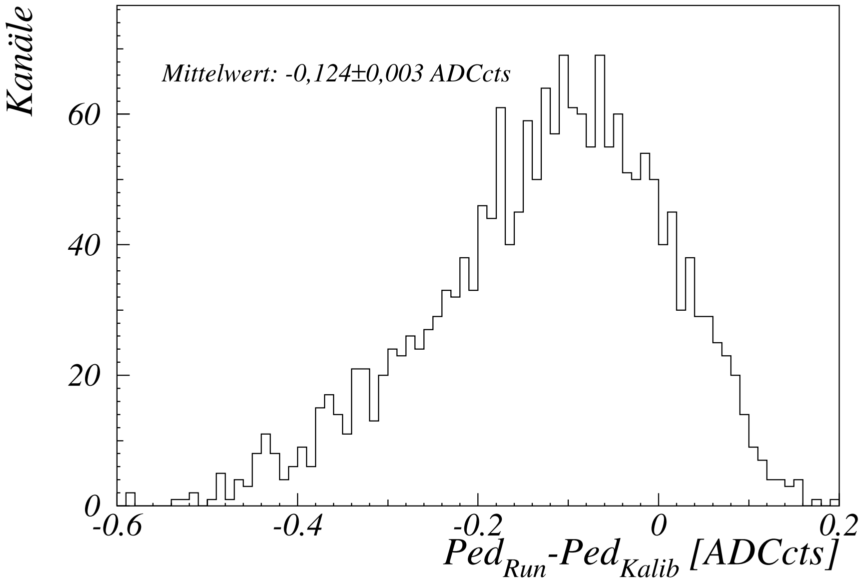


Abbildung 3.7: *Unterschied zwischen den in Rauschereignissen* $\mathrm{Ped}_{\mathrm{Run}}$ *gemessenen und den in der Kalibration* $\mathrm{Ped}_{\mathrm{Kalib}}$ *bestimmten Pedestals für den Bereich des FB1H*

heit von $\overline{E}$, ist dabei bei allen untersuchten Datensätzen kleiner als 0,15 ADCcts. Die Unsicherheit setzt sich dabei aus einem statistischen Fehler von ca. 3 % und einer systematischen Unsicherheit von Ped_{Kalib} von 0,05 ADCcts zusammen. Die systematische Unsicherheit resultiert daraus, daß ein neu ermittelter Pedestalwert nicht in jedem Fall gegen den zuvor ermittelten ausgetauscht wird (s. Abschn. 2.4.3)

Abbildung 3.7 zeigt die dem Wert $\overline{E}$ entsprechende Differenz $Ped_{\mathrm{Run}} - Ped_{\mathrm{Kalib}}$ (s. Formel 3.18) für die Auslesekanäle des FB1H. Es fällt auf, daß die Verteilung von $Ped_{\mathrm{Run}} - Ped_{\mathrm{Kalib}}$ asymmetrisch ist. Zudem ist der Mittelwert mit $-0,124 \pm 0,003\ ADCcts$ signifikant von Null verschieden. Beides läßt sich nicht durch die Unsicherheiten von $\overline{E}$ erklären. Durch die Unsicherheit wäre vielmehr mit einer um Null zentrierten, symmetrischen Verteilung zu rechnen. Es muß daher von systematischen Unterschied zwischen Ped_{Run} und Ped_{Kalib} ausgegangen werden.

Der aus der Differenz $Ped_{\mathrm{Run}} - Ped_{\mathrm{Kalib}}$ resultierende Fehler der in einer Auslesezelle gemessenen Energie, hat aufgrund der Umrechnungsfaktoren C_{Q2E} (s. Formel 3.11) in den unterschiedlichen Sektionen des Kalorimeters unterschiedliche Größe. In hadronischen Sektionen ist der Fehler durch den Unterschied der Pedestals allgemein um einen Faktor zwei größer als in elektromagnetischen.

Abbildung 3.8 zeigt die mittleren Werte

$$M = \frac{\sum\limits_{i=1}^{N} \overline{E_i}}{N}$$

mit:

$\overline{E}$ $\hat{=}$ mittlere gemessene Energiedeposition in einer Auslesezelle in Rauschereignissen
N Anzahl der Auslesezellen einer Sektion des LAr-Kalorimeters

der Verteilung von $\overline{E}$ für die verschiedenen Sektionen des LAr-Kalorimeters. Zusätzlich ist die Standardabweichung R der Verteilung von $\overline{E}$ in den einzelnen Sektionen aufgetragen.

Es ist zu erkennen, daß in den Auslesezellen der unterschiedlichen Sektionen des LAr-Kalorimeters systematisch zu viel bzw. zu wenig deponierte Energie gemessen wird. In einigen Sektionen, wie z.B. dem BBE, ist der resultierende Fehler vernachlässigbar, in anderen Sektionen, wie z.B. dem FB1H wird die Energieskala durch die Differenz $Ped_{\mathrm{Run}} - Ped_{\mathrm{Kalib}}$ jedoch deutlich verzerrt. Neben der zum Teil deutlichen Verzerrung der Energieskala in den einzelnen Sektionen, ist an der Größe von R zu erkennen, daß selbst innerhalb von Sektionen große Unterschiede in der Differenz $Ped_{Run} - Ped_{Kalib}$ existieren. So ist an dem Wert von R für das OF2H (s. Abb. 2.3) zu erkennen, daß dort Auslesekanäle auftreten, bei denen $Ped_{Run} - Ped_{Kalib} > 5\,MeV$ ist und ebenso auch andere auftreten, bei denen $Ped_{Run} - Ped_{Kalib} < -7,5\,MeV$ ist. Hierdurch sind deutliche Asymmetrien in gemessenen Energiedepositionen in einzelnen Sektionen des LAr-Kalorimeters zu erwarten. Hierauf wird in Abschnitt 6.5 genauer eingegangen.

Inwieweit die Unterschiede der Pedestals systematisch sind oder durch Fluktuationen bzw. teilweise aufgetretene Fehlkalibration hervorgerufen werden, klärt eine Untersuchung der zeitlichen Stabilität von $Ped_{Run} - Ped_{Kalib}$ in den Auslesekanälen.

Abbildung 3.9 zeigt die über alle Auslesekanäle des CB2H gemittelte Differenz $\mathrm{Ped}_{\mathrm{Run}} - \mathrm{Ped}_{\mathrm{Kalib}}$ für 7 unterschiedliche Zeitpunkte innerhalb eines Zeitraums von 14 Monaten. Es ist zu erkennen. daß unabhängig von Schwankungen, die auf äußere Bedingungen zurückzuführen sind, die mittlere Differenz $\mathrm{Ped}_{\mathrm{Run}} - \mathrm{Ped}_{\mathrm{Kalib}}$ systematisch von Null verschieden ist.

Die Ursache der Differenz $\mathrm{Ped}_{\mathrm{Run}} - \mathrm{Ped}_{\mathrm{Kalib}}$ stammt aus dem Bereich der ANRUs und ADCs. Dieses läßt sich aus Korrelationen zwischen Analogboxen schließen, in denen die Auslesekanäle vom Betrag große Differenzen $\mathrm{Ped}_{\mathrm{Run}} - \mathrm{Ped}_{\mathrm{Kalib}}$ haben. Es fallen Gruppen von Analogboxen auf, die mit der jeweils gleichen ANRU (s. Abschn. 2.4.2) verbunden sind und in allen Auslesekanälen vom Betrag vergleichsweise große Werte von $\mathrm{Ped}_{\mathrm{Run}} - \mathrm{Ped}_{\mathrm{Kalib}}$ haben. In der folgenden Tabelle ist die Größe $\overline{Ped_{Run} - Ped_{Kalib}}$ für zwei ausgewählte Kombinationen von ANRUs und ADCs aufgetragen[5]. $\overline{Ped_{Run} - Ped_{Kalib}}$ bezeichnet dabei den Mittelwert von $Ped_{Run} - Ped_{Kalib}$ aller Auslesekanäle einer Analogbox:

---

[5] In der Tabelle sind die Analogboxen aufgeführt, die mit ANRU-crate 1/ ANRU-slot 2 bzw. ANRU-crate 1/ ANRU-slot 16 verbunden sind.

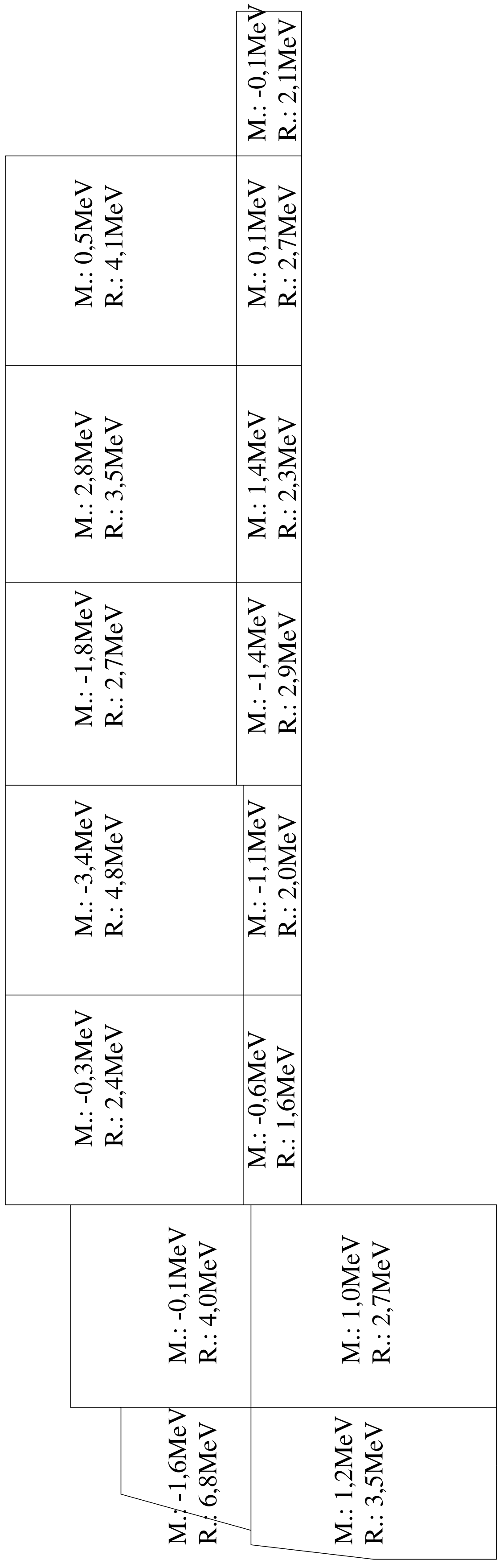


Abbildung 3.8: *Die Abbildung zeigt die Mittelwerte M der Verteilung von $\overline{E}$ für Auslesekanäle jeweils einer Sektion des LAr-Kalorimeters; R bezeichnet die Standardabweichung der Verteilung von $\overline{E}$ in jeweils einer Sektion*

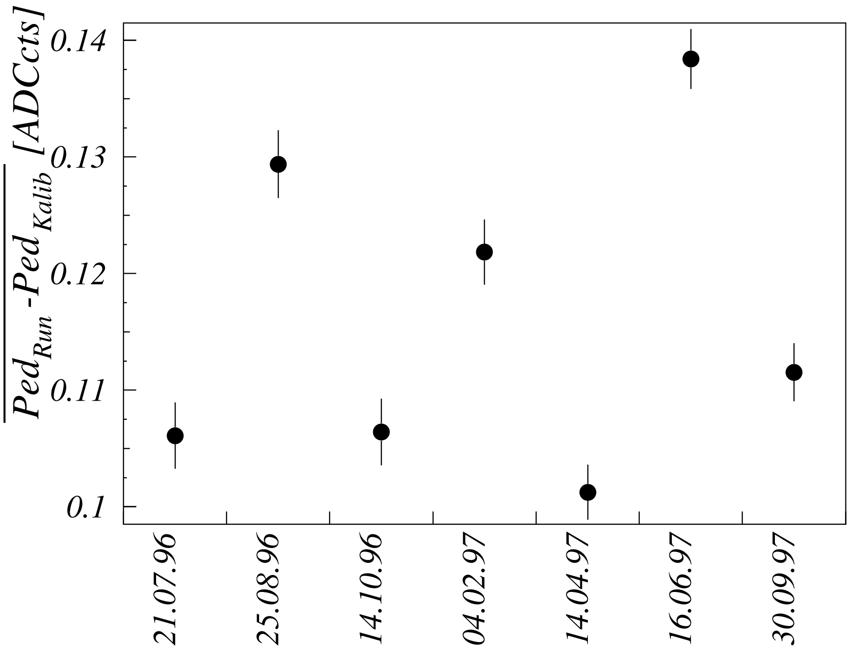


Abbildung 3.9: *Mittlere Differenz zwischen den in Rauschereignissen* Ped_{Run} *und den in der Kalibration* Ped_{Kalib} *bestimmten Pedestals in der Sektion CB2H im Zeitraum von 14 Monaten*

Analogbox #	258	259	263	264
$\overline{Ped_{Run} - Ped_{Kalib}}$ [MeV]	-4,5	-3,8	-3,3	-3,2
Analogbox	495	501	509	510
$\overline{Ped_{Run} - Ped_{Kalib}}$ [MeV]	6,6	8,1	8,3	8,1

Eine genauere Eingrenzung der Fehlerquelle ist derzeit nicht möglich.

Es ist notwendig, die durch $Ped_{Run} - Ped_{Kalib}$ auftretenden Fehler zu beheben. Dazu sind grundsätzlich zwei Wege denkbar. Zum einen ist eine Reparatur der Elektronik möglich. Dieses ist als sehr arbeits- und kostenintensiv einzuschätzen, da zunächst die Fehlerquelle genau lokalisiert werden muß und danach ggf. eine teilweise Erneuerung der Ausleseelektronik notwendig ist. Aufgrund der zeitlichen Stabilität der Pedestal-Differenz ist es auch denkbar, in der Energierekonstruktion die Differenz durch Korrekturterme auszugleichen. Die Korrekturterme können z.B. aus Rauschereignissen bestimmt werden.

Im Rahmen dieser Arbeit wurden Korrekturfunktionen entwickelt, welche die Differenz $Ped_{Run} - Ped_{Kalib}$ innerhalb der primären Energierekonstruktion (H1REC) oder auf dem Niveau von Energien, für bereits rekonstruierte Ereignisse, korrigieren. Für Testzwecke wurde als Korrekturterm der Mittelwert von $Ped_{Run} - Ped_{Kalib}$ innerhalb eines Zeitraums von 9 Monaten für jeden Auslesekanal bestimmt.

Die Korrekturfunktion wurde unter anderem an Datensätzen mit Rauschereignissen getestet. In Abbildung 3.10 ist die in einem beliebig gewählten Datensatz mit Rauschereig-

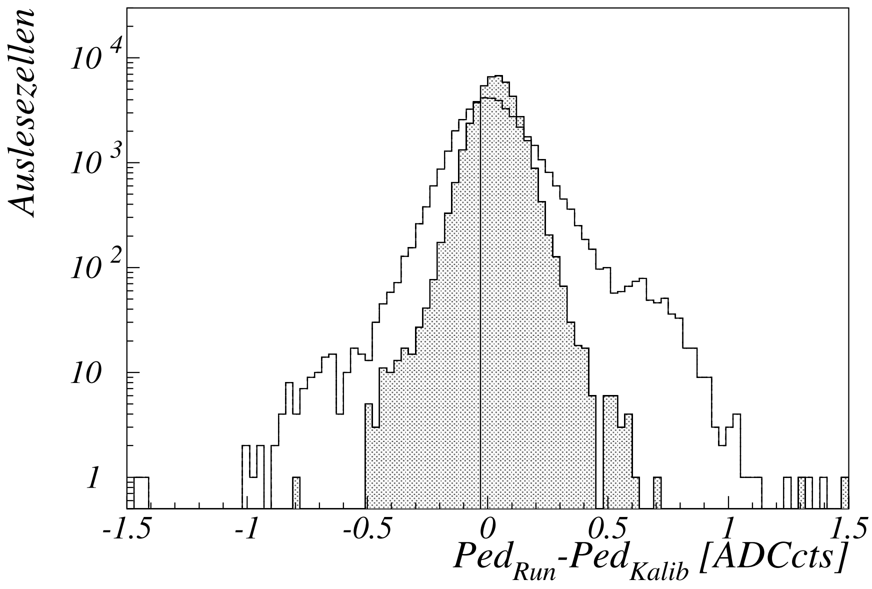


Abbildung 3.10: *Vergleich zwischen dem in einem Datensatz mit Rauschereignissen* Ped_{Run} *und dem in der Kalibration* Ped_{Kalib} *gefundenen Pedestal vor (offenes Histogramm) bzw. nach (schattiertes Histogramm) der Anwendung der Korrekturfunktion zum Ausgleich der Differenz der Pedestals; es sind alle Auslesezellen des LAr-Kalorimeters aufgetragen*

nissen gefundene Differenz $Ped_{\mathrm{Run}} - Ped_{\mathrm{Kalib}}$ für alle Auslesezellen des LAr-Kalorimeters dargestellt. Das offene Histogramm stellt die gemessenen Werte von $\mathrm{Ped}_{\mathrm{Run}} - \mathrm{Ped}_{\mathrm{Kalib}}$ vor der Anwendung der Korrekturfunktion dar. Die Werte, die nach der Anwendung der Korrekturroutine gemessen werden, sind als schattiertes Histogramm überlagert. Es ist die deutliche Reduktion der Standardabweichung der Verteilung $\mathrm{Ped}_{\mathrm{Run}} - \mathrm{Ped}_{\mathrm{Kalib}}$ durch die Anwendung der Korrekturfunktion zu erkennen.

Auslesekanäle, bei denen auch nach der Anwendung der Korrekturfunktion die Differenz der Pedestals ca. -0,4 ADCcts beträgt, sind mit einem defekten Generator der warmen Kalibration verbunden. Der Defekt trat innerhalb des Zeitraums auf, aus dem die Korrekturterme bestimmt werden. Daher können die Korrekturterme für diese Kanäle die Differenz $\mathrm{Ped}_{\mathrm{Run}} - \mathrm{Ped}_{\mathrm{Kalib}}$ nur zum Teil ausgleichen.

Derzeit wird in Analysen bei H1 die Auswirkung der Korrekturfunktion untersucht. Aus diesen Analysen liegen noch keine Ergebnisse vor [41].

Es ist für die nahe Zukunft geplant, Korrekturterme zu bestimmen, die für kürzere Zeitintervalle gültig sind. Dadurch wird es möglich, die zeitlichen Schwankungen von $Ped_{\mathrm{Run}} - Ped_{\mathrm{Kalib}}$ (s. Abb. 3.9) zu berücksichtigen. Ebenso können plötzlich auftretende Fehler der Elektronik korrigiert werden, die Auswirkungen auf $Ped_{\mathrm{Run}} - Ped_{\mathrm{Kalib}}$ haben. Die Korrekturroutine wird, nachdem die Tests abgeschlossen sind, allgemein für Analysen bei H1 zur Verfügung gestellt.

Es ist für die Zukunft zu überlegen, die Pedestals, die in der Kalibration bestimmt werden, noch vor dem Abspeichern in die DSPs auf die Differenz $Ped_{\mathrm{Run}} - Ped_{\mathrm{Kalib}}$ hin zu korrigieren. Diese Methode der Korrektur bewirkt, daß die Ladungen, die in Auslesezellen influenziert werden, bei der Datennahme direkt korrekt bestimmt werden. Es ist bei dieser Korrekturmethode keine weitere Offline-Korrektur der Differenz $Ped_{Run} - Ped_{Kalib}$ notwendig.

3.5 Überprüfung der Extrapolation von warmer zu kalter Kalibration

Für ca. 0,6 % der Auslesekanäle des LAr-Kalorimeters ist wegen fehlender Verbindungen zu Pulsgeneratoren keine kalte Kalibration möglich. Ebenso ist bei jeder kalten Kalibration für einige Auslesekanäle der Wert χ^2/dof bei der Anpassung der Parameter P_i größer als 20, so daß die P_i in der Ladungsrekonstruktion nicht benutzt werden (s. Abschn. 3.1.2). Für diese beiden Gruppen von Kanälen werden die Parameter P_i durch eine Extrapolation der in warmer Kalibration bestimmten Parameter P_i' ermittelt:

$$P_i = f(E_i, C_D) \cdot P_i' \tag{3.19}$$

mit:

P_i $\hat{=}$ Parameter zur Beschreibung des Signal-Ladungs-Zusammenhangs bestimmt in der kalten Kalibration
P_i' $\hat{=}$ Parameter zur Beschreibung des Signal-Ladungs-Zusammenhangs bestimmt in der warmen Kalibration
C_D $\hat{=}$ Kapazität der Auslesezelle, die zum Auslesekanal gehört
E_i $\hat{=}$ Extrapolationskoeffizienten von warmer zu kalter Kalibration

$f(E_i, C_D)$ ist dabei ein Polynom 2. Grades in C_D mit den Koeffizienten E_i.

Der Unterschied zwischen den in den ADCs gemessenen Signalen in der warmen und in der kalten Kalibration hängt vom Aufbau der Ausleseelektronik bis zum Vorverstärkertransistor ab. Daher müssen die Extrapolationsfaktoren bei Änderungen an der Ausleseelektronik im Bereich vor den Vorverstärkern neu bestimmt werden. Nach den beiden ersten Phasen des Upgrades (s. Kapitel 5) wurden bislang noch keine neuen Extrapolationsfaktoren bestimmt.

Als Maß für den Fehler, der derzeit bei einer Extrapolation der Parameter P_i' auftreten, wird die Größe

$$\Delta P_{1_{exp}} = \frac{P_1 - f(E_i, C_D) \cdot P_i'}{P_1} \tag{3.20}$$

betrachtet. Um die Größe $\Delta P_{1_{exp}}$ bestimmen zu können, werden Auslesekanäle untersucht, welche die Möglichkeit zu warmer und kalter Kalibration haben. In Abbildung 3.11 ist als schattiertes Histogramm die Größe $\Delta P_{1_{exp}}$ aufgetragen. Die große Streuung der auftretenden Fehler ist durch den Einfluß von $f(E_i, C_D)$ zu erklären. Bei unterschiedlich großen

Werten von C_D hat $\Delta P_{1_{exp}}$ eine andere Größe. Bei großen Werten von C_D kann der Fehler bei der Extrapolation bis zu 10 % betragen (s. Abb. 3.11).

Im Rahmen dieser Arbeit wurden neue Extrapolationsfaktoren bestimmt. Die Werte von $\Delta P_{1_{exp}}$, die unter Verwendung der neu bestimmten Extrapolationskoeffizienten auftreten, sind in Abbildung 3.11 als offenes Histogramm aufgetragen. Es ist die deutliche Reduktion der Fehler bei der Extrapolation zu erkennen.

Es ist anzunehmen, daß sich aufgrund der weiteren Änderungen an der Ausleseelektronik im Winter 1997/98 (s. Anhang A) die Extrapolationsfaktoren vieler Sektionen deutlich ändern werden. Daher ist unbedingt notwendig, die Extrapolationsfaktoren vor Beginn der Datennahmeperiode 1998 erneut zu bestimmen.

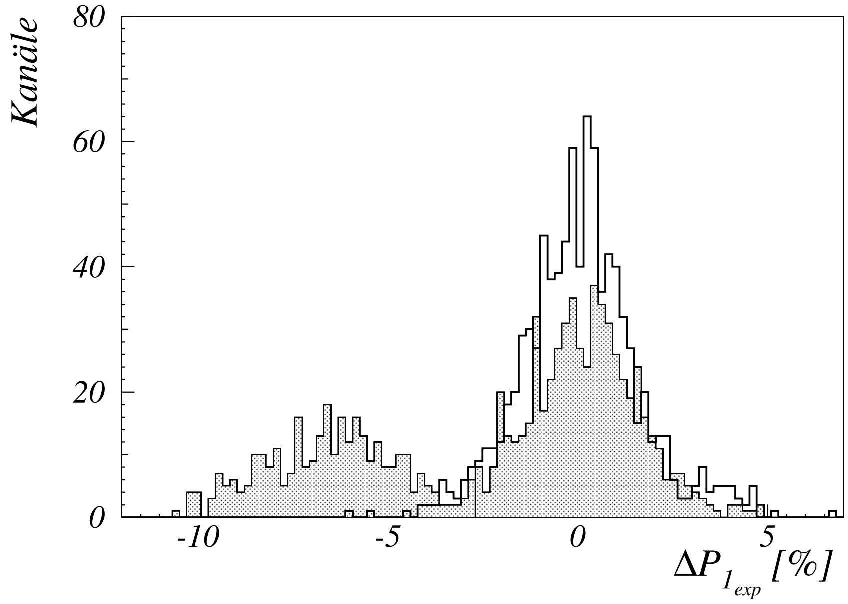


Abbildung 3.11: *Fehler $\Delta P_{1_{exp}}$, der Parameter P_i bei der Extrapolation aus den in warmer Kalibration bestimmten $P_i^{\prime}$, vor (schattiertes Histogramm) bzw. nach (offenes Histogramm) der Neubestimmung der Extrapolationskoeffizienten*

Kapitel 4

Untersuchungen zum Rauschen im LAr-Kalorimeter

Die Signalhöhen, die in einem Verstärker verarbeitet werden können, sind nach oben sowie nach unten begrenzt. Während bei zu großen Signalen Nichtlinearitäten des Verstärkers begrenzend wirken, ist die untere Grenze der Signalhöhen vom Störpegel abhängig. Der Störpegel setzt sich dabei aus zwei unterschiedlichen Gruppen von Störsignalen zusammen:

- Zum einen ist das System Störungen von innen und außen ausgesetzt. Zu nennen sind hier z.B. Einstreuungen von externen Signalen, Netzbrummen oder Störungen durch kalte Lötstellen. Diese Störungen können durch geeignete Abschirmungen und sorgsame Verarbeitung der Elektronik im Prinzip beliebig klein gehalten werden.

- Die zweite Gruppe von Störsignalen stellt das Rauschen dar. Es liegt im atomaren Aufbau der Leiter sowie in der quantenhaften Natur des Leitungsprozesses begründet. Die Störung durch Rauschen kann grundsätzlich nicht beliebig klein gehalten werden.

Die Funktionalität von Triggern und die Auslesegenauigkeit hängen direkt vom Störpegel ab. Es muß daher angestrebt werden, Rauschquellen zu identifizieren und die Struktur des vorliegenden Rauschens zu klären, um es daraufhin reduzieren zu können.

4.1 Theorie des Rauschens

Die wichtigsten Arten des Rauschens sind thermisches Rauschen, Schrotrauschen und 1/f-Rauschen [45, 46]. Sie werden im folgenden detailliert diskutiert.

4.1.1 Thermisches Rauschen

Die Elektronen im Leitungsband eines Festkörpers bewegen sich aufgrund ihrer thermischen Energie unter Wechselwirkung mit den Gitteratomen mit der Geschwindigkeit $\vec{v}$. Die Bewegung der Elektronen ist dabei zufällig und im Mittel verschwindend:

$$\overline{\vec{v}} = \frac{\sum N \vec{v}_i}{N} = \vec{0} \tag{4.1}$$

mit:

N Gesamtheit aller Elektronen im Leitungsband

Das quadratische Mittel des durch die Elektronen bewirkten Stromes verschwindet jedoch nicht. Befindet sich ein Widerstand in dem Leiter, so fällt an diesem eine Spannung sowie eine Leistung ab. Diese Leistung wird als „Rauschleistung“ bezeichnet. Es läßt sich unter Zuhilfenahme der statistischen Mechanik ableiten, daß die Rauschleistungsdichte unabhängig von der betrachteten Frequenz der Wechselspannung ist:

$$\frac{d\overline{N_{R_{therm}}}}{df} = kT$$

mit:

$\overline{N_{R_{therm}}}$ $\hat{=}$ gemittelte Rauschleistung des thermischen Rauschens
f $\hat{=}$ Frequenz der Wechselspannung
k $= 1,380658 \cdot 10^{-23}\, \frac{J}{K}$ (Boltzmann-Konstante)
T $\hat{=}$ Temperatur des Leiters

Rauschen, bei dem $\frac{d\overline{N_R}}{df}$ unabhängig von f ist, wird als „weiß“ bezeichnet.

Der mittlere quadratische Rauschstrom $\overline{i^2_{R_{therm}}}$ in einem Leiter hat die Größe:

$$\overline{i^2_{R_{therm}}} = \frac{4kTB}{R}$$

mit:

$\overline{i^2_{R_{therm}}}$ $\hat{=}$ gemittelter quadratischer Rauschstrom des thermischen Rauschens
B $\hat{=}$ Bandbreite des Frequenzspektrums
R $\hat{=}$ Größe des Widerstandes
k $= 1,380658 \cdot 10^{-23}\, \frac{J}{K}$ (Boltzmann-Konstante)
T $\hat{=}$ Temperatur des Leiters

4.1.2 Schrotrauschen

Schrotrauschen tritt auf, wenn unabhängige Ereignisse zufällig auftreten können. Quellen des Schrotrauschens sind beispielsweise die Emission von Elektronen aus einer Photokathode oder auch ein kontinuierlicher Strom, in welchem die Zahl der Ladungsträger statistischen Schwankungen unterworfen ist. Es gilt für den zeitabhängigen Strom $i(t)$:

$$i(t) = \overline{i(t)} + i_{R_{Schrot}}(t)$$

wobei $\overline{i(t)}$ die nach der Überlagerung aller Einzelbewegungen resultierende einheitliche Bewegung der Elektronen ist. Dem im Mittel gemessenen Strom ist mit $i_{R_{Schrot}}(t)$ ein Rauschstrom überlagert. Dieser resultiert aus der Wechselwirkung der Elektronen mit allen anderen Elektronen bzw. dem Gitter. Im Gegensatz zu $\overline{i^2_{R_{therm}}}$ ist $\overline{i^2_{R_{Schrot}}}$ vom mittleren Stromfluß $\overline{i(t)}$ abhängig:

$$\overline{i^2}_{R_{Schrot}} = 2q_e \cdot \overline{i(t)} \cdot B \tag{4.2}$$

mit:

$\overline{i^2_{R_{Schrot}}}$ $\hat{=}$ mittlerer quadratischer Rauschstrom des Schrotrauschens
q_e $= 1,602 \cdot 10^{-19}\,C$ (Elementarladung)
$\overline{i(t)}$ $\hat{=}$ mittlerer Stromfluß
B $\hat{=}$ Bandbreite des Frequenzspektrums

Bei kleinen Stromflüssen trägt Schrotrauschen daher nicht nennenswert zum Rauschen bei. Es ist zu erkennen, daß $\frac{d\overline{i^2_{R_{Schrot}}}}{df}$ nicht von der Frequenz f abhängig ist. Das Spektrum von Schrotrauschen ist also ebenso „weiß“.

4.1.3 1/f-Rauschen

Bei vielen Bauteilen findet sich zusätzlich im Niederfrequenzbereich ein von der Frequenz f abhängiges Rauschverhalten mit einer Proportionalität von $1/f^{\nu}$ ($\nu \approx 0,8 - 1,5$). Die Ursache dieses Rauschens ist nicht endgültig geklärt, wird jedoch wahrscheinlich von verschiedenen Festkörpereffekten hervorgerufen. Hier sind z.B. unterschiedliche Kontaktwiderstände zwischen den Kohlekörnchen in Widerständen oder auch Oberflächeneffekte an Halbleitern zu nennen [45, 46].

4.2 Rauschquellen der Elektronik des LAr-Kalorimeters

Im LAr-Kalorimeter wird die Energie der Teilchen anhand der Anzahl der Ionenpaare im Argon der Auslesezellen bestimmt. Das Paar Auslese- und HV-Platte stellt dabei eine kapazitive Ladungsquelle dar (s. Abb. 2.5 und Abschn. 2.2.1). In der Ausleseelektronik des LAr-Kalorimeters werden ladungssensitive Vorverstärker eingesetzt. Diese integrieren die Ladung aus dem Detektor auf ihrer Rückkoppelkapazität und halten das Signal mit langen Relaxationszeiten als Ausgangsspannung. Es ist bekannt, daß bei guter Planung des Aufbaus der Elektronik das Verhältnis des Ausgangssignals zum Rauschpegel durch den ersten Transistor des Vorverstärkers bestimmt wird [43]. Die theoretische Beschreibung des Rauschens, das aus dem Bereich vor dem Transistor stammt, sollte daher den Rauschpegel der Ausleseelektronik gut annähern.

An dieser Stelle ist es sinnvoll, den Begriff der ,,rauschäquivalenten Ladung“ ENC einzuführen. Die Signale, die aufgrund des Rauschens der Ausleseelektronik gemessen werden, sind gausförmig verteilt. Den so gemessenen Signalen entsprechen Ladungen, die scheinbar auf die Ausleseplatten des influenziert wurden. Die ENC entspricht dabei der Ladung, die ein Signal erzeugt, welches die gleiche Höhe hat, wie die Breite der Verteilung der Rausch-Signale [45]. Wenn im weiteren die Begriffe ‚Rauschen‘ oder ‚Rauschpegel‘ verwendet werden, ist die ENC gemeint. Für die erwartete ENC der Ausleseelektronik des LAr-Kalorimeters gilt [47, 48]:

$$\begin{aligned} ENC^2 \;=\; & \frac{2kTA_1}{\tau_M}\left[\frac{\alpha C_{IN}}{gm}\left(\sqrt{\frac{C_T}{C_{IN}}}+\sqrt{\frac{C_{IN}}{C_T}}\right)^2 C_T + R_s C_T^2\right] \\ & +A_2\left[H_f\left(\sqrt{\frac{C_T}{C_{IN}}}+\sqrt{\frac{C_{IN}}{C_T}}\right)^2 C_T + \frac{b_f}{2\pi}\right] \\ & +\tau_M A_3\left(qI_{IN}+\frac{2kT}{R_P}\right) \end{aligned} \tag{4.3}$$

mit:

k $= 1,380658 \cdot 10^{-23}\,\frac{J}{K}$ (Boltzmann-Konstante)
T $\hat{=}$ Temperatur des Halbleiters in K
α $\hat{=}$ Transistorkonstante (2/3 für JFETs)
gm $\hat{=}$ Steilheit des Eingangstransistors des Vorverstärkers
C_{IN} $\hat{=}$ Eingangskapazität des JFETs
C_T $\approx$ Kapazität der Auslesezelle (C_D)
R_s $\hat{=}$ serieller Eingangswiderstand (als HV-Schutz)
H_f $\hat{=}$ 1/f-Rauschkoeffizient des Transistors
b_f $\hat{=}$ 1/f-Rauschkoeffizient der Dielektrika am Verstärkereingang
q $= 2 \cdot 1,602 \cdot 10^{-19}\,C$ (Ladung eines Elektronenpaares)
I_{IN} $\hat{=}$ Gate-Strom des JFETs
R_P $\hat{=}$ paralleler Rauschwiderstand
τ_M $\hat{=}$ Signalformungszeit des pulsgeformten Signals
A_1 - A_3 $\hat{=}$ Formfaktoren

Die Terme zwei und drei in Formel 4.3 beschreiben den Beitrag frequenzabhängigen und parallelen Rauschens auf den Rauschpegel. Beim Entwurf der Ausleseelektronik wurde darauf geachtet, diese beiden Terme klein zu halten [43], so daß der erste Term in Formel 4.3 den Rauschpegel bei kleinen Signalen dominiert. Es ist zu erkennen, daß der Zusammenhang zwischen ENC^2 und der Kapazität der Auslesezelle durch ein Polynom 2. Grades in C_T beschrieben werden kann. Eine quantitative Analyse ergibt, daß der quadratische Term dieses Polynoms den dominierenden Anteil liefert.

Inwieweit bei merklicher Signalhöhe in der Auslesekette ein zusätzlicher Beitrag vom Schrotrauschen auftritt, wird unter Punkt 4.4.3 untersucht.

In Formel 4.3 tritt der Faktor $\frac{1}{\tau_M}$ auf, welcher den Einfluß der Signalformungszeit auf den Rauschpegel beschreibt. Da im Triggerzweig eine andere Signalformungszeit als im Auslesezweig verwendet wird, ist ein Verhältnis der Rauschpegel von $\sqrt{\frac{\tau_{\text{Auslese}}}{\tau_{\text{Trigger}}}}$ zu erwarten. Wenn das Rauschen, wie angenommen, durch den ersten Term in Formel 4.3 beschrieben wird, sollte zwischen dem Rauschpegel im Auslese- und Triggerzweig ansonsten kein Unterschied bestehen. Auch dieses wird im weiteren untersucht.

4.3 Benutzte Datensätze bei der Rauschuntersuchung

Zur Untersuchung des Rauschens im Auslesezweig bieten sich prinzipiell zwei Möglichkeiten an. Einerseits stehen Datensätze von Rauschereignissen (s. Abschn. 3.4) zur Verfügung. Wenn die Auslese des Detektors nicht zufällig kurz nach einem physikalischen Ereignis erfolgt, sollte in Rauschereignissen in den Auslesekanälen des LAr-Kalorimeters kein Signal registriert werden. Durch das elektronische Rauschen werden in den Auslesekanälen jedoch Signale registriert.

Abbildung 4.1 zeigt die Signaleinträge S_{ADC}, die in einem Auslesekanal in einem Datensatz mit Rauschereignissen gemessen werden. Die Einheit des ADCs wird für die Darstellung in den entsprechenden Energiewert umgerechnet.

Die in einer Auslesezelle gemessenen Energiedepositionen sind in Abbildung 4.1 dargestellt. Überlagert ist eine an die Daten angepaßte Normalverteilung. Die diskreten Werte von S_{ADC} sind auf die diskreten Stufen in der Digitalisierung der Signale in den ADCs zurückzuführen. Der Abstand zweier möglicher Werte von S_{ADC} beträgt für die betrachtete Auslesezelle nach Formel 3.11

$$P_1 \cdot C_{Q2E} \cdot C_{korr} \approx 16,3\,MeV$$

Diese Vereinfachung von Formel 3.11 ist möglich, da die nicht-linearen Terme des Polynoms bei den niedrigen, durch Rauschen bewirkten Signalen vernachlässigbar sind (s. Abb. 3.2). Für die praktische Anwendung wird im folgenden die Standardabweichung des Energiespektrums (s. Formel 3.5) als Rauschpegel des Auslesekanals σ_{Zelle} bezeichnet.

Eine weitere Möglichkeit zur Untersuchung des Rauschens eröffnen die innerhalb der Kalibration der Ausleseelektronik des LAr-Kalorimeters berechnete Standardabweichung der Signalhöhenverteilung in Kanälen bei verschiedenen Pulshöhen (s. Abschn. 3.1.1). Hierzu muß vorrausgesetzt werden, daß die Genauigkeit der von den Pulsgeneratoren injizierten Ladung so hoch ist, daß die Standardabweichung nur auf das Rauschen der Ausleseelektronik zurückzuführen ist. Die in Abschnitt 4.4.3 dargestellte Untersuchung des Einflusses des Schrotrauschens auf die Signalauslese zeigt, daß die Ladungspulse der Pulsgeneratoren als genau genug angenommen werden können. Unter der Annahme einer Gauß'schen Verteilung der gemessenen Signale läßt sich die Standardabweichung der Signalhöhenverteilung eines Auslesekanals als Rauschpegel σ_{Zelle} deuten.

Für die TRICAL genannte Untersuchung des Rauschens im Triggerzweig wird eine Methode ähnlich der kalten Kalibration des Auslesezweiges (s. Punkt 3.1.1) angewandt. Eine

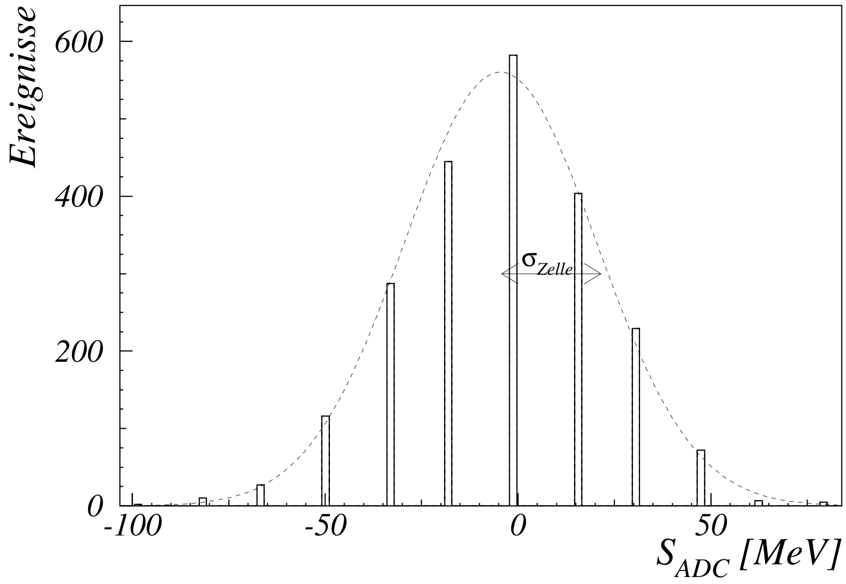


Abbildung 4.1: *Signaleinträge S_{ADC} eines Auslesekanals in einem Datensatz mit Rauschereignissen; überlagert ist eine an die Daten angepaßte Normalverteilung; eingetragen ist zusätzlich der Rauschpegel σ_{Zelle} des Auslesekanals*

Untersuchung erfolgt bei TRICAL jedoch nur bei einer festgelegten Pulshöhe[1] der Pulsgeneratoren. Dieses ist ausreichend, da nur das Rauschen der TCs bestimmt werden soll und nicht der Signal-Ladungs-Zusammenhang, wie es in der kalten Kalibration des Auslesezweiges geschieht.

Bei TRICAL wird gleichzeitig in alle Auslesezellen, die zu einer Triggerzelle gehören, eine Pulsladung injiziert. Um den statistischen Fehler der Messung zu verringern, werden nacheinander 100 Ladungspulse der gleichen Pulshöhe injiziert. Die Signalantwort auf die Pulse wird jeweils in den FADCs des Triggerzweiges (s. Abb. 2.8) digitalisiert und in den DSPs linear und quadratisch summiert. Die Digitalisierung der Signale erfolgt dabei im Bereich von vier BCs um das erwartete Signalmaximum.

In Abbildung 4.2 ist die nach den 100 Pulsen berechnete lineare Summe S der Signale für eine Triggerzelle aufgetragen. Die Einheit *FADCcts* bezeichnet dabei die Quantelung der digitalen Signale der FADCs. Nominell entspricht 1 FADCct 125 MeV. Das erwartete Signalmaximum liegt beim BC 0. Es ist zu erkennen, daß für die in Abbildung 4.2 betrachtete Triggerzelle das Signalmaximum um ca. einen BC zu spät eintritt.

Aus der linearen und quadratischen Summe der Signale läßt sich mittels Formel 3.5 die Standardabweichung σ_{TC} der Verteilung der gemessenen Signale für jeden BC berechnen. In Abbildung 4.3 sind die nach Formel 4.2 berechneten Werte von σ_{TC} aufgetragen, deren

---

[1] Üblich sind 350 DACcts

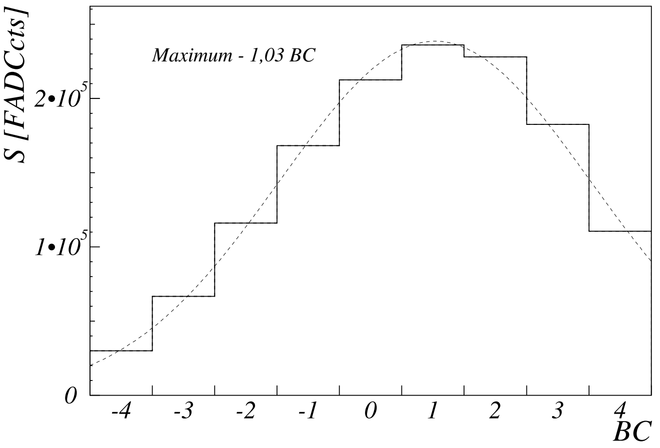


Abbildung 4.2: *Lineare Summe S der Signale, die für unterschiedliche HERA-Taktzyklen BCs für eine Triggerzelle gemessen wird; überlagert ist eine an die Signalverteilung angepaßte Normalverteilung*

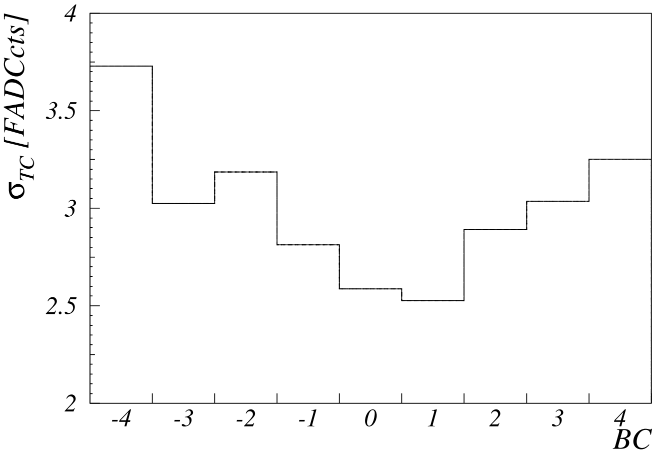


Abbildung 4.3: *Standardabweichung σ_{TC} der Signalverteilung, die in TRICAL für eine Triggerzelle zu unterschiedlichen HERA-Taktzyklen BCs im Bereich des erwarteten Signalmaximums berechnet wird*

Signalspektrum in Abbildung 4.2 dargestellt ist. Es ist zu erkennen, daß für unterschiedliche BCs unterschiedlich hohe Werte von σ_{TC} gemessen werden. σ_{TC} wird bei dem BC minimal, an dem das Signalmaximum vorliegt. Das Rauschen der Elektronik darf jedoch nicht sensitiv auf den Auslesezeitpunkt sein. Die Terme, die zu einer Erhöhung von σ_{TC} im Vergleich zum *BC* des Signalmaximums führen, können daher nur externe Störungen sein. Aus diesem Grund wird im folgenden die Standardabweichung am Signalmaximum als Rauschpegel σ_{TC} einer Triggerzelle bezeichet. Es ist anzunehmen, daß das so festgelegte

σ_{TC} auch nicht frei von externen Störungen ist. Die Störungen werden am Signalmaximum jedoch minimal.

Es ist nicht möglich, σ_{TC} aus Datensätzen mit Rauschereignissen zu bestimmen. Die Schwellenwerte der AGMs (s. Punkt 2.4.1) lassen sich nicht exakt auf Null setzen. Hierdurch werden gemessene Rauschsignale systematisch verfälscht, so daß keine Aussagen möglich sind [49]. In TRICAL werden die Schwellen der AGMs dadurch umgangen, daß die Signale, die bei injizierten Ladungspulsen gemessen werden, so hoch sind, daß die Schwellenwerte der AGMs sich nicht mehr auswirken.

4.4 Rauschen innerhalb des Auslesezweiges

Allgemein läßt sich der Rauschpegel σ_{Zelle} der Auslesekanäle durch

$$\sigma^2_{\mathrm{Zelle}} = \sigma^2_c(C_D) + \sigma^2_0 \tag{4.4}$$

mit:

σ_{Zelle} $\hat{=}$ Rauschpegel eines Auslesekanals
σ_c $\hat{=}$ Kapazitätsabhängiger Teil des Rauschpegels eines Auslesekanals
σ_0 $\hat{=}$ Kapazitätsunabhängiger Teil des Rauschpegels eines Auslesekanals

beschreiben. In Abbildung 4.4 ist die Größe σ_{Zelle} für Auslesezellen des CB1E in Abhängigkeit von der Kapazität C_D der zugehörigen Auslesezellen aufgetragen. Zudem ist ein an die Datenpunkte angepaßtes Polynom 1. Grades überlagert. Es ist zu erkennen, daß ein näherungsweise linearer Zusammenhang zwischen σ_{Zelle} und C_D existiert, wobei der kapazitätsabhängige Term $\sigma_c(C_D)$ des Rauschpegels bei großen Werten von C_D den dominierenden Beitrag zu σ_{Zelle} liefert. Der lineare Zusammenhang stimmt gut mit dem aufgrund der Überlegung in Abschnitt 4.2 erwarteten Zusammenhang von σ_{Zelle} und C_D überein. Bei kleinen Werten von C_D ist der Anteil σ_0 dominierend. Dieser entspricht dem y-Achsenabschnitt des Polynoms, daß den Datenpunkten in Abbildung 4.4 überlagert ist. In den hadronischen Sektionen des LAr-Kalorimeters trägt σ_0 häufig mit 50 % und mehr zum Rauschpegel von Auslesekanälen bei.

4.4.1 Vergleich des Rauschens zwischen Kalibration und Datennahme

Es ist wichtig, daß die Rauschpegel übereinstimmen, die mit unterschiedlichen Methoden und unter unterschiedlichen Bedingungen bestimmt werden. Treten Unterschiede zwischen den Rauschpegeln auf, die in der Kalibration bzw. in Rauschereignissen ohne und mit Teilchenstrahlen im Beschleuniger bestimmt werden, so weist dieses auf eine Beeinflussung durch die Datennahme-Bedingungen oder auf Fehler bei der Bestimmung der Rauschpegel hin.

Abbildung 4.5 zeigt die Abweichung der in der Kalibration bestimmten Rauschpegel $\sigma_{Zelle_{Kalib}}$, von denen, die in Rauschereignissen ohne Teilchenstrahlen im Beschleuniger

σ_{Zelle_-} bestimmt werden, normiert auf $\sigma_{Zelle_{Kalib}}$. Es sind jeweils die über eine Sektion gemittelten Abweichungen für alle Sektionen des LAr-Kalorimeters aufgetragen.

Im Rahmen der Fehler ist kein Unterschied zwischen σ_{Zelle_-} und $\sigma_{Zelle_{Kalib}}$ nachzuweisen. Fehler bei der Bestimmung des Rauschens werden damit auf einen Bereich unterhalb des Meßbaren eingrenzt.

Abbildung 4.6 zeigt den Unterschied der Rauschpegel, der zwischen Datensätzen mit Rauschdaten mit σ_{Zelle_+} und ohne σ_{Zelle_-} Teilchenstrahlen im Beschleuniger in den unterschiedlichen Sektionen des LAr-Kalorimeters gemessen wird. Die Sektionen IF1E und IF2H sind zusätzlich noch in einen Teil aufgeteilt, der nahe am Strahlrohr liegt und einen, der weiter entfernt ist.

Die Größe M bezeichnet den Mittelwert des Quotienten $\frac{\sigma_{Zelle_+}-\sigma_{Zelle_-}}{\sigma_{Zelle_-}}$ in jeder Sektion. Die Größe R entspricht der Standardabweichung der Verteilung von $\frac{\sigma_{Zelle_+}-\sigma_{Zelle_-}}{\sigma_{Zelle_-}}$.

Es ist zu erkennen, daß R in den meisten Sektionen einen Wert von ungefähr 2 % hat. Diese Größe ist durch die statistische Unsicherheit von σ_{Zelle_+} und σ_{Zelle_-} zu erklären. In einigen Sektionen des vorwärtigen Kalorimeter treten jedoch Erhöhungen von R bis zu 15,7 % auf.

Weiterhin ist zu erkennen, daß in den meisten Sektionen M vom Betrag sehr nahe bei 0

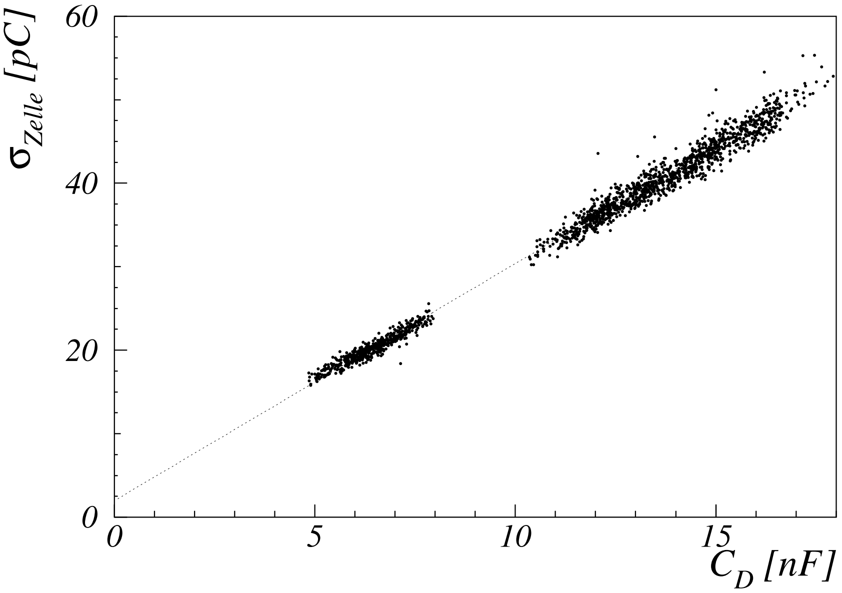


Abbildung 4.4: *FunktionalerZusammenhang zwischen dem Rauschpegel σ_{Zelle} eines Auslesekanals und der Kapazität C_D der zugehörigen Auslesezelle für Auslesekanäle des CB1E (s. Abb. 2.3); es ist ein an die Datenpunkte angepaßtes Polynom ersten Grades überlagert*

liegt. Nur in den Teilen der Sektionen von IF1E und IF2H, die nahe am Strahlrohr liegen, ist eine deutliche Erhöhung der Rauschpegel dadurch festzustellen, daß Teilchenstrahlen im Beschleunigerring sind.

Um die Ursache der großen Differenz zwischen σ_{Zelle_+} und σ_{Zelle_-} im IF1E und IF2H zu untersuchen, wird im folgenden die Verteilung gemessener Energien in einem Auslesekanal betrachtet.

In Abbildung 4.7 sind für einen Auslesekanal aus dem IF1E die S_{ADC} entsprechenden Energieeinträge in Rauschereignissen mit Teilchenstrahlen im Beschleuniger als offenes Histogramm aufgetragen. Die Energieeinträge, die in dem gleichen Auslesekanal in Rauschereignissen gemessen werden, wenn keine Teilchenstrahlen im Beschleuniger sind, sind als schattiertes Histogramm überlagert. Durch den großen Energiebereich, der in Abbildung 4.7 dargestellt wird, ist die Quantisierung der gemessenen Energieeinträge im Gegensatz zu Abbildung 4.1 nicht zu erkennen. Das schattierte Histogramm hat eine Form, wie sie aufgrund des thermischen Rauschens in dem Auslesekanal zu erwarten ist. Im offenen Histogramm ist eine Aufweitung der um Null zentrierten Verteilung zu erkennen. Ebenso werden sehr hohe und stark negative Energien gemessen. Diese Unterschiede gegenüber den Rauschereignissen ohne Teilchenstrahlen im Beschleuniger lassen sich dadurch erklären, daß bei der zufälligen Auslese aller Kanäle manchmal Koinzidenzen mit echten Physik-Ereignissen oder mit Strahl-Gas- bzw. Strahl-Wand-Ereignissen auftreten. Diese

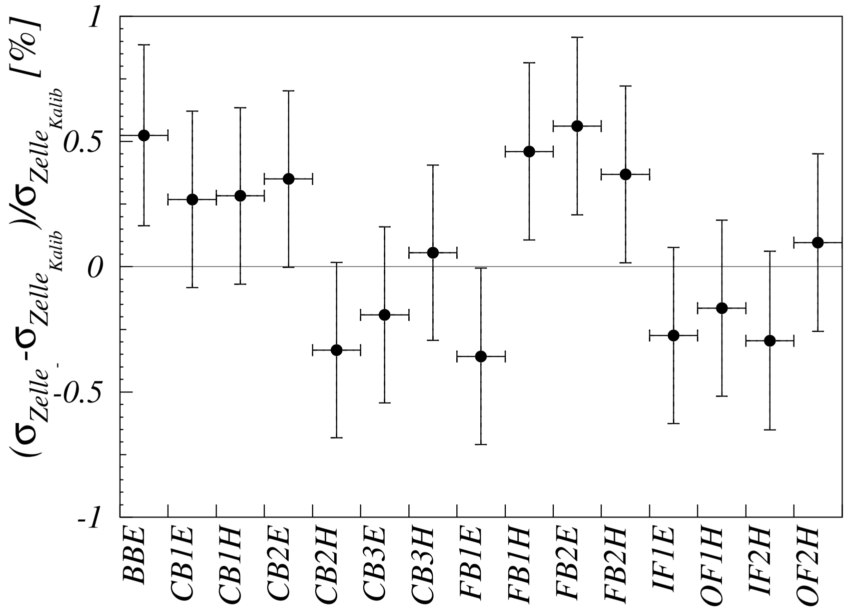


Abbildung 4.5: *Unterschied der gemessenen Rauschpegel zwischen Kalibrationsdaten $\sigma_{Zelle_{Kalib}}$ und Rauschereignissen $\sigma_{\mathrm{Zelle}_-}$ ohne Teichenstrahlen im Beschleunigerring normiert auf $\sigma_{Zelle_{Kalib}}$; es sind die über jeweils eine Sektion gemittelten Einträge aufgetragen*

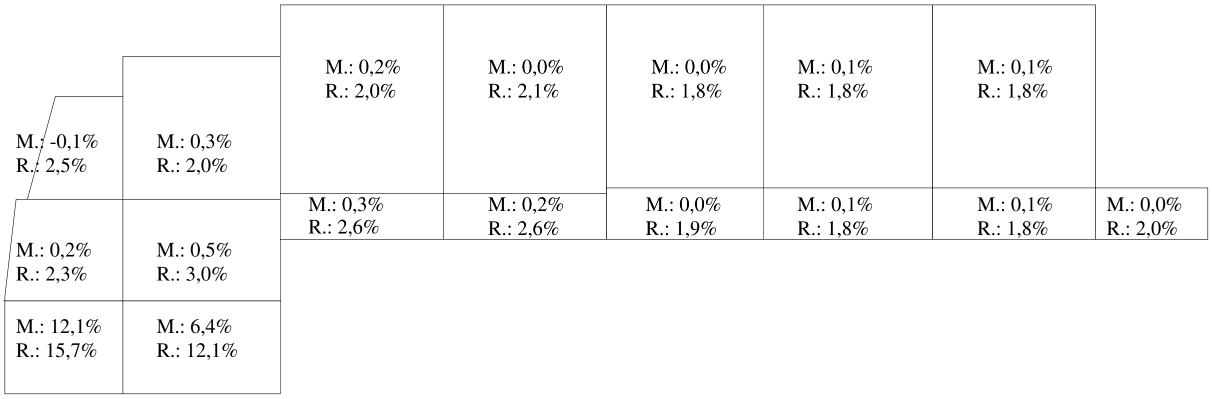


Abbildung 4.6: *Die Graphik zeigt die Erhöhung der Rauschpegel der Auslesekanäle im LAr-Kalorimeter in Rauschereignissen mit Teilchenstrahlen im Beschleuniger im Vergleich zu Rauschereignissen ohne Teilchenstrahlen im Beschleuniger; M bezeichnet die mittlere Erhöhung der Rauschpegel in einer Sektion, R bezeichnet die Standardabweichung der Verteilung in einer Sektion*

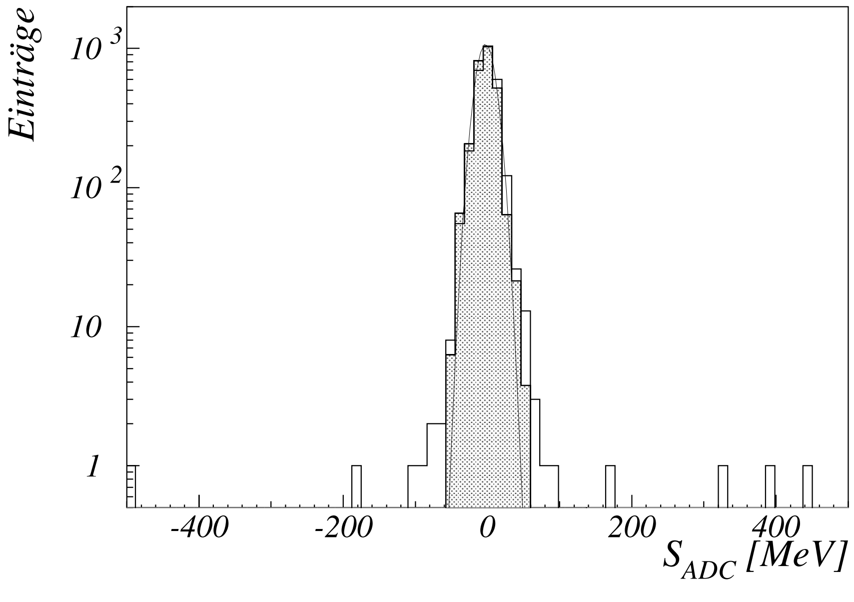


Abbildung 4.7: *Gegenüberstellung der in einem Auslesekanal registrierten Energien in Rauschereignissen mit (offen) und ohne (schattiert) Teilchenstrahlen im Beschleuniger*

Koinzidenzen sind in Abbildung 4.7 an den gemessenen Energien von mehr als 150 MeV im untersuchten Auslesekanal zu erkennen.

Im Abschnitt 2.4.2 wurde erwähnt, daß die Signale der Auslesezellen auf den ANCDs bipolar geformt wird. Erfolgt die Auslese eines Kanals dann, wenn der negative Teil des bipolaren Signals, das von einem vorhergegangenen Ereigins stammt, auf der Sample-and-Hold-Stufe liegt, können auch stark negative Energien registriert werden. Die stark negativen Energieeinträge in Abbildung 4.7 sind dadurch zu erklären.

Da bei der Berechnung der Rauschpegel mit Hilfe von Formel 3.5 die wenigen, vom Betrag großen Energieeinträge stark gewichtet werden, wird der berechnete Rauschpegel dadurch verfälscht. Hierdurch sind in Abbildung 4.6 die stark erhöht bestimmten Rauschpegel in den Sektionen IF1E und IF2H zu erklären.

Die Standardabweichung der um Null zentrierten Verteilung ändert sich, wie in Abbildung 4.7 zu erkennen ist, durch die Anwesenheit von Teilchenstrahlen nur wenig. Die in einem Bereich von 2σ um den Mittelwert der Verteilung angepaßten Normalverteilungen ergeben:

$$\begin{aligned} \sigma_{Zelle_-} &= 12,5 \pm 0,19\,\mathrm{MeV} \\ \sigma_{Zelle_+} &= 13,3 \pm 0,22\,\mathrm{MeV} \end{aligned}$$

4.4.2 Rauschen der „hinteren Ausleseelektronik“

Es ist bislang nicht möglich, die Ursache des Terms σ_0 genau zu lokalisieren. Dennoch besteht die Möglichkeit, die Region der Ausleseelektronik einzugrenzen, in der sich die Rauschquelle befindet. Diese Eingrenzung ermöglichen die unterschiedlich hohen Verstärkungen der Signale auf den Übersetzerkarten (s. Abschn. 2.4.2). Der Bereich der Ausleseelektronik hinter der Signalverstärkung auf einer Übersetzerkarte wird im weiteren als „hintere Ausleseelektronik“ bezeichnet.

Im folgenden wird der Rauschpegel der Kanäle mit einer Verstärkung von 2 auf der Übersetzerkarte mit anderen einer Verstärkung von 4 verglichen. Dieses geschieht anhand von Datensätzen mit Rauschereingnissen. Hierzu sind einige Vorüberlegungen notwendig:

- Der Zusammenhang zwischen den in Rauschereignissen gemessenen Energiedepositionen und den von den ADCs gemessenen Signalen wird durch Formel 3.11 beschrieben:
$$E_{dep} = C_{Q2E} \cdot C_{korr} \cdot \sum_{i=1}^{3} P_i \cdot (S_{ADC} - Ped)^i$$
- Die Signale, die in den ADCs durch das Rauschen der Ausleseelektronik gemessen werden, sind so klein, daß das Polynom in Formel 3.11 durch den linearen Term angenähert werden kann:
$$E_{dep} \approx C_{Q2E} \cdot C_{korr} \cdot P_1 \cdot (S_{ADC} - Ped)$$
- Der Rauschpegel σ_{Kalib}, der für einen Auslesekanal in der Kalibration bestimmt wird, entspricht der Standardabweichung der Verteilung von $(S_{ADC} - Ped)$. Für den

Rauschpegel σ_{Run}, der in Rauschereignissen bestimmt wird, gilt (s. Abschn. 4.4.1):

$$\sigma_{Run} = C_{Q2E} \cdot C_{korr} \cdot P_1 \cdot \sigma_{Kalib}$$

- Die Signale der betrachteten Auslesekanäle werden auf den Übersetzerkarten um die Faktoren 2 bzw. 4 verstärkt. Als Folge davon ist der Gradient $P_1(g4)$ des Signal-Ladungs-Zusammenhangs der Kanäle mit einer Verstärkung von 4 auf einer Übersetzerkarte doppelt so groß wie der Gradient $P_1(g2)$ der Auslesekanäle mit einer Verstärkung von 2. Da die Bauteile der Auslesekette produktionsbedingt leicht unterschiedlich sind, tritt der Faktor 2 zwischen $P_1(g4)$ und $P_1(g2)$ nur näherungsweise auf:

  $$P_1(g4) \approx 2 \cdot P_1(g2)$$

- Im allgemeinen Fall ist anzunehmen, daß der Rauschpegel σ eines Auslesekanals aus einem Anteil σ_v und einem Anteil σ_h besteht. Der Term σ_v bezeichnet den Anteil der Ausleseelektronik vor der Signalverstärkung auf den Übersetzerkarten am Rauschpegel σ des jeweiligen Auslesekanals. σ_h bezeichnet den Anteil der Ausleseelektronik hinter der Verstärkung auf den Übersetzerkarten an σ:

  $$\sigma^2 = \sigma_v^2 + \sigma_h^2$$

- Untersucht werden im folgenden Auslesekanäle bei denen die zugehörigen Auslesezellen die gleiche Kapazität C_D haben. Dieses ist notwendig, da der Rauschpegel eines Auslesekanals stark von C_D abhängt (s. Abb. 4.4). Allgemein ist anzunehmen, daß sich σ_v aus einem Anteil $\sigma_{v_C}(C_D)$ zusammensetzt, der von C_D abhängig ist, und einem Anteil σ_{v_0}, der von C_D unabhängig ist:

  $$\sigma_v^2 = \sigma_{v_C}^2(C_D) + \sigma_{v_0}^2$$

- Es ist aufgrund der unterschiedlichen Signalverstärkungen auf den Übersetzerkarten zu erwarten, daß der Term $\sigma_v(g4)$, der den Term σ_v eines Kanals mit der Signalverstärkung von 4 auf einer Übersetzerkarte entspricht, ungefähr doppelt so groß ist wie der Term $\sigma_v(g2)$, der dem Term σ_v eines Kanals mit der Signalverstärkung von 2 entspricht:

  $$\sigma_v(g4) \approx 2 \cdot \sigma_v(g2)$$

  Der Term $\sigma_h(g4)$ sollte hingegen gleich groß sein wie $\sigma_h(g2)$, da die hintere Ausleseelektronik für beide Gruppen von Auslesekanälen gleich sind.

Unter Zuhilfenahme der Vorüberlegungen läßt sich folgende Beziehung ableiten:

$$\begin{aligned}
\sigma^2_{Run}(g2) - \sigma^2_{Run}(g4) &\approx (c \cdot P_1(g2) \cdot \sigma(g2)_{Kalib})^2 - (c \cdot P_1(g4) \cdot \sigma(g4)_{Kalib})^2 \\
&\approx c^2 \cdot \left[(2 \cdot P_1(g4) \cdot \sigma(g2)_{Kalib})^2 - (P_1(g4) \cdot \sigma(g4)_{Kalib})^2\right] \\
&\approx c^2 \cdot \Bigg[(2P_1(g4))^2 \cdot \left(\left\{\frac{\sigma_{v_{Kalib}}(g4)}{2}\right\}^2 + \sigma_{h_{Kalib}}(g4)^2\right) \\
&\qquad - (P_1(g4))^2 \cdot \left(\sigma^2_{v_{Kalib}}(g4) + \sigma^2_{h_{Kalib}}(g4)\right)\Bigg] \\
&= (cP_1(g4))^2 \cdot \left[\sigma^2_{v_{Kalib}}(g4) + 4\sigma^2_{h_{Kalib}}(g4) - \sigma^2_{v_{Kalib}}(g4) - \sigma^2_{h_{Kalib}}(g4)\right] \\
&= 3\,(cP_1(g4)\sigma_{h_{Kalib}}(g4))^2 \qquad (4.5)
\end{aligned}$$

mit:

$P_1(g2/4)$	$\hat{=}$ Koeffizient des linearen Terms des Polynoms zur Ladungsrekonstruktion für Auslesekanäle mit einer Signalverstärkung von 2 bzw. 4 auf einer Übersetzerkarte(s. Formel 3.6)
c	$\hat{=}$ Umrechnungsfaktor der registrierten Ladung in Energie (s. Formel 3.11) = $C_{\mathrm{Q2E}} \cdot C_{\mathrm{korr}}$
$\sigma_{Run}(g2/4)$	$\hat{=}$ Rauschpegel, der in Rauschereignissen für Auslesekanäle mit einer Signalverstärkung von 2 bzw. 4 auf den Übersetzerkarten gemessen wird [GeV]
$\sigma(g2/g4)_{\mathrm{Kalib}}$	$\hat{=}$ Rauschpegel, der in der Kalibration für Auslesekanäle mit einer Signalverstärkung von 2 bzw. 4 auf den Übersetzerkarten gemessen wird [ADCcts]
$\sigma_{(v/h)_{Kalib}}(g2/4)$	$\hat{=}$ Rauschbeiträge aus der Region vor (v) bzw. hinter (h) der Signalverstärkung auf den Übersetzerkarten gemessen in der Kalibration [ADCcts]

Es ist nach Gleichung 4.5 mit einer deutlichen Differenz $\sigma^2_{Run}(g2) - \sigma^2_{Run}(g4)$ zu rechnen, wenn σ_h merklich zu σ beiträgt. Die Untersuchung kann nur sinnvoll in Sektionen durchgeführt werden, in denen Auslesekanäle mit einer Signalverstärkung 4 auf einer Übersetzerkarte neben anderen mit einer Verstärkung von 2 vorkommen. Dieses trifft für die Sektionen CB3E und FB1E zu. Ein Vergleich der Rauschpegel von Auslesekanälen aus verschiedenen Sektionen ist nicht möglich, da die Rauschpegel von Auslesekanälen mit gleichem C_D und gleicher Verstärkung auf den Übersetzerkarten in unterschiedlichen Sektionen leicht voneinander abweichen. Das Ergebnis würde systematisch verfälscht.

In Abbildung 4.8 ist das Quadrat σ^2_{Run} der Rauschpegel der Kanäle des CB3E in Abhängigkeit von der Kapazität C_D der zugehörigen Auslesezellen aufgetragen. Überlagert sind zwei Polynome 2. Grades in C_D. Diese entsprechen Polynomen, die an die Rauschpegel der Kanäle mit einer Signalverstärkung von 4 bzw. 2 auf den Übersetzerkarten angepaßt wurden. Es ist zu erkennen, daß $\sigma^2_{Run}(g2)$ konstant oberhalb $\sigma^2_{Run}(g4)$ für Auslesekanäle mit gleichem C_D liegt. Die in Formel 4.5 berechnete Differenz $\sigma^2_{Run}(g2) - \sigma^2_{Run}(g4)$ läßt sich aus Abbildung 4.8 zu $156 \pm 1,6\,MeV^2$ bestimmen. Aus dieser Differenz läßt sich mit Hilfe der Formel 4.5 die Größe $(cP_1(g4)\sigma_{h_{Kalib}}(g4))$ zu $7,21 \pm 0,036\,MeV$ berechnen. Der von der

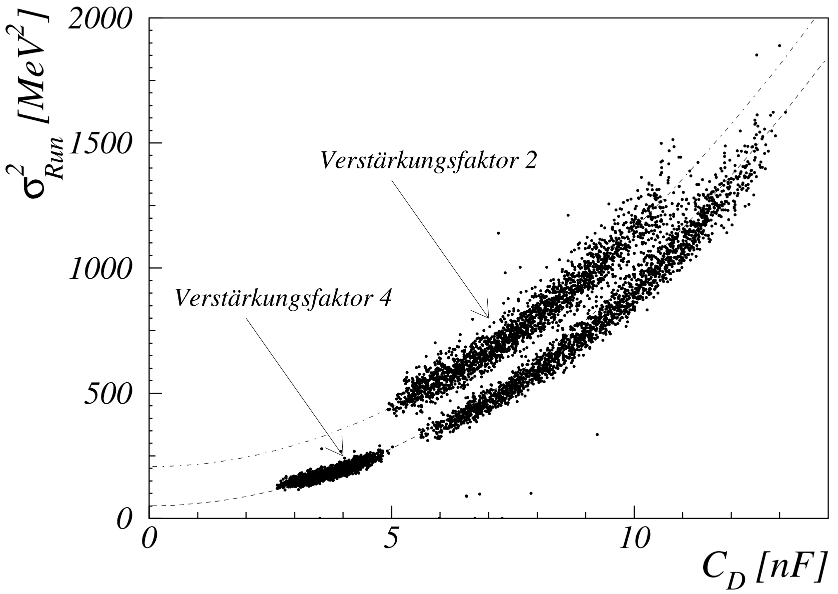


Abbildung 4.8: *Quadrat σ^2_{Run} des Rauschpegels der Kanäle mit einer Signalverstärkung von 2 bzw. 4 auf der Übersetzerkarte in Abhängigkeit von der Kapazität C_D der zugehörigen Auslesezelle; betrachtet werden die Auslesekanäle der Sektion CB3E; die Daten stammen aus Rauschereignissen; überlagert sind an die Datenpunkte der beiden Gruppen angepaßte Polynome 2. Grades in C_D*

Kapazität unabhängige Term $\sigma_{RE_0}(g4)$ des Rauschpegels der Auslesekanäle, deren Signale auf einer Übersetzerkarte um den Faktor 4 verstärkt werden, beträgt $7,13 \pm 0,024\,MeV$ (s. Abb. 4.8). Es ist zu erkennen, daß $(cP_1(g4)\sigma_{h_{Kalib}}(g4))$ im Rahmen der Fehler mit $\sigma_{RE_0}(g4)$ verträglich ist. Dieses bedeutet, daß der hypothetisch eingeführte Term σ_{v_0} nicht nachzuweisen ist. Der von der Kapazität unabhängige Anteil σ_0 der Rauschpegel stammt somit aus dem Bereich der hinteren Ausleseelektronik.

4.4.3 Struktur des Rauschens

Im vorhergehenden Abschnitt wurde gezeigt, daß der Rauschpegel der Auslesekanäle einem kapazitätsabhängigen Term $\sigma_v(C_D)$ und einem Beitrag aus dem Bereich der hinteren Ausleseelektronik σ_h zusammengesetzt ist. In diesem Abschnitt werden die Arten des Rauschens untersucht (s. Abschn. 4.1), die zum Rauschpegel der Auslesekanäle beitragen.

Thermisches Rauschen

In Rauschereignissen ohne Teilchenstrahlen im Beschleuniger werden im Idealfall nur Beiträge des thermischen, weißen Rauschens der Ausleseelektronik gemessen. Da im Mittel durch die thermische Bewegung der Elektronen kein Strom fließt, trägt Schrotrauschen nicht zum Rauschpegel bei (s. Abschn. 4.1.2). Es wird im folgenden untersucht, ob zusätzlich zum thermischen Rauschen auch externe Störungen vorliegen, deren Beeinflussung in Rauschereignissen zu messen ist.

Im Gegensatz zu externen Störungen treten für weißes Rauschen statistisch verteilte Signaleinträge innerhalb eines Auslesekanals auf. Als Verteilungsfunktion des Rauschens ist eine Normalverteilung zu erwarten (s. Abb 4.1). Die Standardabweichung σ_{Zelle} der Verteilung, die in verschiedenen Datensätzen mit Rauschereignissen für einen Auslesekanal bestimmt wird, ist aufgrund der statistischen Ungenauigkeit der Messung nicht bei jeder Messung gleich. Eine Aussage über die statistische Natur des Rauschens ist mit Hilfe eines χ^2-Tests [50] möglich. Hierzu müssen die Standardabweichungen σ_{Zelle_i} und deren statistische Ungenauigkeit

$$\sigma(\sigma_{Zelle_i}) = \frac{\sigma_{Zelle_i}}{\sqrt{2N}}$$

mit:

σ_{Zelle_i} $\hat{=}$ Rauschpegel eines Auslesekanals in einem untersuchten Datensatz mit Rauschereignissen
$\sigma(\sigma_{Zelle_i})$ $\hat{=}$ statistische Unsicherheit von σ_{Zelle_i}
N $\hat{=}$ Anzahl der Ereignisse in dem Datensatz

für Messungen zu verschiedenen Zeitpunkten i bekannt sein. Im Fall von statistisch verteilten Werten σ_{Zelle_i} in einem Auslesekanal ergibt der χ^2-Test

$$\frac{\chi^2}{dof} = 1$$

mit:

χ^2 $\hat{=}$ χ^2-Verteilung [50]
dof $\hat{=}$ Anzahl der Freiheitsgerade; in diesem Spezialfall: Anzahl untersuchten der Datensätze - 1

Es ist zu erwarten, daß der Wert von „1“ wird dabei nicht exakt von allen Auslesekanälen angenommen wird. Im Mittel vieler Auslesezellen liegt bei einer statistischen Verteilung der Wert von $\frac{\chi^2}{dof}$ jedoch bei 1.

Es werden in dieser Analyse 19 Datensätze untersucht, die über einen Zeitraum von 5 Monaten verteilt sind.

In Abbildung 4.9 ist der Wert von χ^2/dof der bei der Untersuchung der Schwankung von σ_{Zelle} bestimmt wird, für alle Auslesekanäle des CBs aufgetragen. Dem Histogramm ist eine Kurve überlagert, welche der theoretischen Verteilung von χ^2/dof für 18 Freiheitsgrade entspricht. Es ist zu erkennen, daß der Mittelwert von 1,05 der Verteilung gut mit der Vorhersage für ein statistisches Verhalten der Rauschpegel weißes Rauschen übereinstimmt. Bei direktem Vergleich mit der theoretischen Vorhersage ist jedoch zu erkennen, daß bei

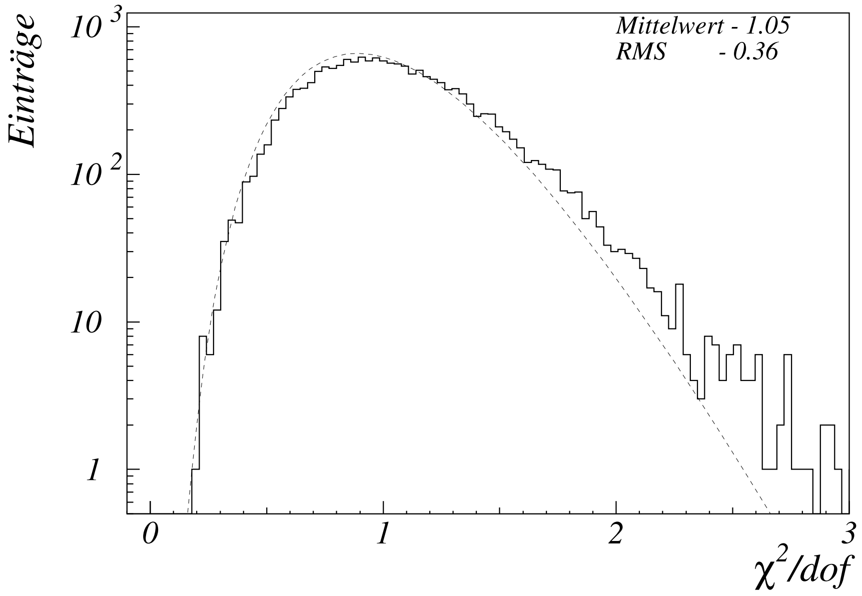


Abbildung 4.9: *χ^2-Verteilung der zeitlichen Schwankung der Rauschpegel für alle Auslesekanäle des CBs (offnes Histogramm); die theoretisch erwartete χ^2-Verteilung ist als gestrichelte Kurve überlagert*

hohen Werten von χ^2/dof zu viele Einträge auftreten. Es existieren möglicherweise leichte externe Störungen, die den Rauschpegel beeinflussen. In guter Näherung läßt sich σ_{Zelle} jedoch mit dem thermischen, weißen Rauschen der Ausleseelektronik gleichsetzen.

Schrotrauschen

Es ist wichtig zu wissen, inwieweit Schrotrauschen die Energieauflösung bei großen Energien merklich beeinträchtigt, wenn die Beeinflussung durch thermisches Rauschen vernachlässigbar geworden ist.

Eine Aussage hierzu kann anhand der Standardabweichung der Signalhöhenverteilung (s. Formel 3.5) bei großen Pulshöhen in der Kalibration getroffen werden. Bei der Untersuchung ist zu berücksichtigen, daß eine Erhöhung der Rauschpegel durch kleine Unterschiede in den Ladungspulsen vorgetäuscht werden kann, die von den Kalibrationsgeneratoren in die Auslesezellen injiziert werden.

Abbildung 4.10 zeigt die Änderung $\Delta\sigma_{Zelle}$ der in Auslesekanälen bei unterschiedlichen Pulshöhen gemessenen Rauschpegel gegenüber dem thermischen Rauschen σ_{Zelle} der Auslesezelle normiert auf σ_{Zelle}. Es sind die jeweils gemittelten Werte zweier sich unterschiedlich verhaltender Gruppen von Auslesekanälen im BBE aufgetragen. Diese Aufspaltung in zwei Gruppen läßt sich in allen Sektionen des LAr-Kalorimeters feststellen.

Bei ca. 2/3 aller Kanäle des BBEs ist der Rauschpegel im gesamten sensitiven Ladungsbereich nahezu konstant. Durch das Verhalten dieser Gruppe kann eine Beeinflussung der Signalauslese durch Schrotrauschen ausgeschlossen werden, da dieses in allen Auslesekanälen gleichermaßen zu einer Erhöhung der Rauschpegel proportional zu $\sqrt{Q_{Puls}}$ führen sollte (s. Abschn 4.1.2). Ebenso ist an der Konstanz der Rauschpegel zu erkennen, daß die Genauigkeit der Ladungspulse der Kalibrationsgeneratoren so hoch ist, daß sich keine Beeinflussung von σ_{Zelle} nachweisen läßt.

Bei der zweiten Gruppe von Kanälen tritt ab einer Pulshöhe von ca. 2,25 pC eine Abhängigkeit des Rauschpegels von Q_{Puls} auf, die bei Pulshöhen größer als 4,5 pC nahezu linear ist. Das Rauschverhalten dieser Gruppe von Auslesekanälen kann durch Fehler im Bereich der Ausleseelektronik vor der Signalverstärkung auf den Übersetzerkarten erklärt werden. Dieses ist daraus zu schließen, daß die Erhöhung $\frac{\Delta\sigma_{Zelle}}{\sigma_{Zelle}}$ bei Auslesekanälen mit einer Signalverstärkung von 2 auf den Übersetzerkarten ungefähr halb so groß ist wie für Kanäle mit einer Signalverstärkung von 4. Eine weitere Eingrenzung des fehlerhaften Bereiches der Aulseseelektronik ist nicht möglich, da keine Korrelation der Auslesekanäle der beiden Gruppen in möglichen Ordnungsschemata (z.B. Kalibrationsgeneratoren, Analogkarten) auftritt.

Wenngleich die Erhöhung des Rauschpegels der Auslesekanäle der 2. Gruppe um 100 %

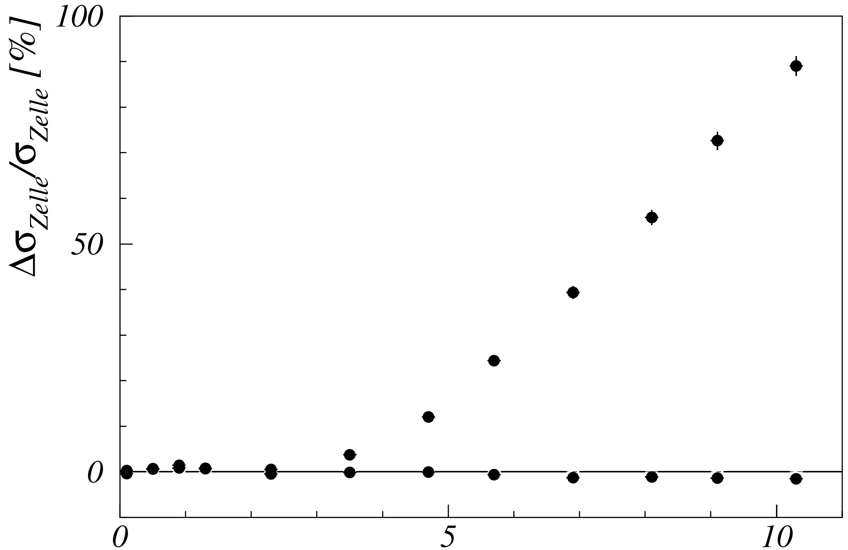


Abbildung 4.10: *Änderung $\Delta\sigma_{\mathrm{Zelle}}$ des Rauschpegels der Auslesezellen normiert auf den Rauschpegel des thermischen Rauschens in den Auslesekanälen σ_{Zelle} in Abhängigkeit der Pulshöhe Q_{Puls} des Kalibrationsgrenerators; aufgetragen sind jeweils die Mittelwerte der beiden sich unterschiedlich verhaltenden Gruppen von Kanälen am Beispiel des BBE*

bei hohen Ladungspulsen bedeutsam erscheint, bedarf es keiner Reparatur, da das Signal-Rausch-Verhältnis bei einer Pulshöhe von 2,25 pC bereits größer als 600 : 1 ist.

4.5 Rauschverhalten im Triggerzweig

In diesem Abschnitt wird das Rauschen im Triggerzweig untersucht. Dabei wird vornehmlich das Rauschen der Triggerzellen betrachtet. Die größeren Einheiten TTs oder BTs sind aus praktischer Sicht interessanter, jedoch erlaubt die große Anzahl an Kanälen, deren Signale summiert werden, keine detaillierten Studien.

Der Rauschpegel σ_{TC} der Triggerzellen berechnet sich im Idealfall als quadratische Summe der Rauschpegel σ_{Zelle_i} der Auslesekanäle i , deren Signale zu einer Triggerzelle summiert werden:

$$\sigma^2_{\mathrm{TC}} = \sum_{i=1}^{N} \sigma^2_{Zelle_i} \tag{4.6}$$

mit:

σ_{TC} $\hat{=}$ Rauschpegel einer Triggerzelle
σ_{Zelle_i} $\hat{=}$ Rauschpegel der Auslesekanäle, die zu einer TC zusammengefaßt werden
N $\hat{=}$ Anzahl der Auslesekanäle, die zu einer TC zusammengefaßt werden

Elektromagnetische und hadronische Triggerzellen haben dabei deutlich unterschiedliche Rauschpegel, da die Signale von 16 bzw. 4 Kanälen zusammengefaßt werden (s. Abschn. 2.4.1). Durch den σ_0-Term des Rauschens im Auslesezweig (s. Abschn. 4.4.2) und einen entsprechenden Term im Triggerzweig ist mit kleinen Unterschieden zwischen den nach Formel 4.6 berechneten und den gemessenen Werten von σ_{TC} zu rechnen. Weiterhin ist unklar, wie stark äußere Störquellen den gemessenen Wert von σ_{TC} beeinflussen (s. Abschn. 4.3).

Nach der Betrachtung des Rauschens im Auslesezweig werden in diesem Abschnitt einzelne Fragestellungen behandelt, um das bekannte Verhalten des Rauschens der Auslesekanäle auf das Rauschen im Triggerzweig auszuweiten:

- Stimmt die Vorhersage, nach der die Störpegel im Triggerzweig um den Faktor $\sqrt{\frac{\tau_{Auslese}}{\tau_{Trigger}}}$ größer sind als im Auslesezweig (s. Formel 4.3)?

- Wie wirken sich einzelne Kanäle im Triggerzweig aus, die in der Auslese durch einen anomal hohen Rauschpegel auffallen?

- Ist auch das Rauschen des Triggerzweiges als weißes Rauschen zu verstehen?

Auf die Fragestellungen wird in den folgenden Abschnitten näher eingegangen.

4.5.1 Vergleich der Rauschpegel in Auslese und Trigger

Formel 4.3 erlaubt eine Vorhersage für das Verhältnis der Rauschpegel im Auslese- und Triggerzweig. Durch den Faktor $\sqrt{\frac{1}{\tau_m}}$, der bei der Berechnung der Rauschpegel einfließt, ist im Triggerzweig ein um den Faktor

$$\sqrt{\frac{\tau_{Auslese}}{\tau_{Trigger}}} = \sqrt{\frac{2,4\,ns}{0,5\,ns}} = 2,19$$

höherer Rauschpegel zu erwarten [51].

Um die im Auslese- und im Triggerzweig bestimmten Rauschpegel vergleichen zu können, muß der Umrechnungsfaktor von $FADCcts$ in GeV bekannt sein. Zu Beginn des H1-Experimentes wurde die Skala der FADCs in der Elektronik so eingestellt, daß 8 FADCcts 1 GeV entsprachen. Seitdem wurden Korrekturfaktoren C_{korr} im Auslesezweig eingefügt, welche die verringerte Ladungssammlungseffizienz ausgleichen (s. Formel 3.11). Daher unterscheiden sich beide Skalen neben dem ursprünglichen Faktor von $8\,\frac{FADCcts}{GeV}$ derzeit um weitere 15 %; der Umrechnungsfaktor beträgt derzeit $9{,}2\,\frac{FADCcts}{GeV}$.

In Abbildung 4.11 ist der Quotient der gemessenen Rauschpegel $\sigma_{TC_{gem}}$ von Triggerzellen und der nach Formel 4.6 berechneten Rauschpegel $\sigma_{TC_{ber}}$ aufgetragen. Es ist eine breite asymmetrische Verteilung zu erkennen, deren Mittelwert bei 2,22 liegt. Der Mittelwert stimmt somit gut mit der theoretischen Vorhersage für das Verhältnis von $\frac{\sigma_{TC_{gem}}}{\sigma_{TC_{ber}}}$ überein. Die leichete Erhöhung gegenüber der theoretischen Erwartung läßt sich durch die nicht-weißen Rauschanteile von $\sigma_{TC_{gem}}$ erklären (s. Abschn. 4.3). Durch die unterschiedliche Größe der nicht-weißen Rauschanteile in Rauschpegeln verschiedener TCs, kommt es zu der Aufweitung der Verteilung von $\frac{\sigma_{TC_{gem}}}{\sigma_{TC_{ber}}}$.

4.5.2 Auswirkungen stark rauschender Auslesezellen

Formel 4.6 ist zu entnehmen, daß einzelne Auslesekanäle mit anomal hohen Rauschpegeln einen großen Einfluß auf den Rauschpegel einer Triggerzelle haben, wenn die Rauschquelle, die den anomal hohen Rauschpegel bewirkt, im Bereich vor der Trennung von Auslese- und Triggerzweig liegt. Da die Rauschpegel der einzelnen Auslesekanäle als quadratische Summation den Rauschpegel der TC ergeben, kann ein hoher Rauschpegel in einem Auslesekanal die Summe in Formel 4.6 dominieren.

Abbildung 4.12 zeigt die funktionale Abhängigkeit zwischen den Rauschpegeln σ_{TC} der Triggerzellen des CB1H und der Kapazität C_{TC} der Triggerzellen. Es ist ein Polynom ersten Grades den Datenpunkten überlagert, daß den linearen Zusammenhang zwischen σ_{TC} und C_{TC} verdeutlicht.

Weiterhin sind einige der Triggerzellen besonders markiert. Triggerzellen, die einen Auslesekanal enthalten, der im Auslesezweig einen anomal hohen Rauschpegel hat, sind durch ein ▼ hervorgehoben. In einer Triggerzelle haben zwei der Auslesekanäle im Auslesezweig einen anomal hohen Rauschpegel. Diese Triggerzelle ist durch ein ★ gekennzeichnet.

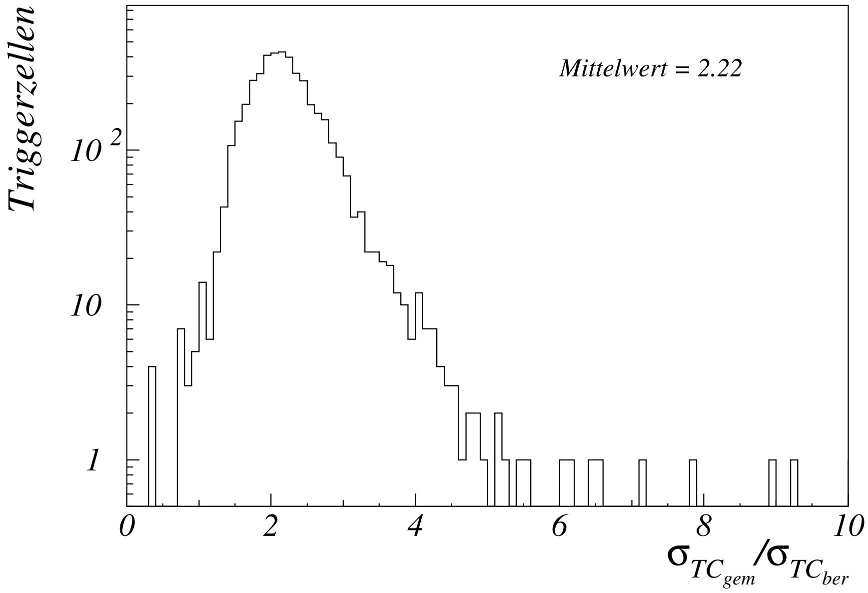


Abbildung 4.11: *Verhältnis von TC-Rauschen, daß aus Daten der Auslese $\sigma_{\mathrm{TC}_{\mathrm{ber}}}$ berechnet bzw. direkt im Triggerzweig $\sigma_{\mathrm{TC}_{\mathrm{gem}}}$ gemessenen wird für alle TCs des LAr-Kalorimeters*

Es ist zu erkennen, daß ein Auslesekanal mit anomal hohem Rauschpegel ausreicht, um den Rauschpegel der ganzen Triggerzelle deutlich anzuheben. Besonders bei Triggerzellen mit kleinem C_{TC} wird der Rauschpegel durch das Rauschen eines Auslesekanals nahezu verdoppelt.

In Abbildung 4.12 ist bei zwei Triggerzellen ein Rauschpegel zu erkennen, der zwischen Auslese- und Triggerzweig nicht korreliert ist. Es ist zu erkennen, das bei einem Wert von C_{TC}, der ca. 4,5 nF beträgt, eine Triggerzelle ein anomal hohen Rauschpegel hat, obwohl keiner der Auslesekanäle auffällig ist, deren Signale zur Triggerzelle summiert werden. Bei einem Wert von C_{TC}, der ca. 5,8 nF beträgt, hat eine Triggerzelle keinen auffälligen Rauschpegel, obwohl einer der Auslesekanäle, die zum Signal der Triggerzelle beitragen, ein anomal hohen Rauschpegel hat. Die beiden gezeigten Effekte können durch große σ_0-Terme im Auslese- bzw. Triggerzweig hervorgerufen werden.

Durch die Auswirkungen einzelner Kanäle auf den Rauschpegel einer ganzen Triggerzelle wird deutlich, daß bei Arbeiten an der Ausleseelektronik des LAr-Kalorimeters besonders sorgsam gearbeitet werden muß. Sind die ausgeführten Arbeiten an der Elektronik nicht fehlerfrei, sind die negativen Auswirkungen auf den Trigger möglicherweise größer als der Gewinn durch Reparatur oder Verbesserung. Dieses ist im Hinblick auf den in Kapitel 5 angesprochenen Upgrade-Prozeß zu beachten.

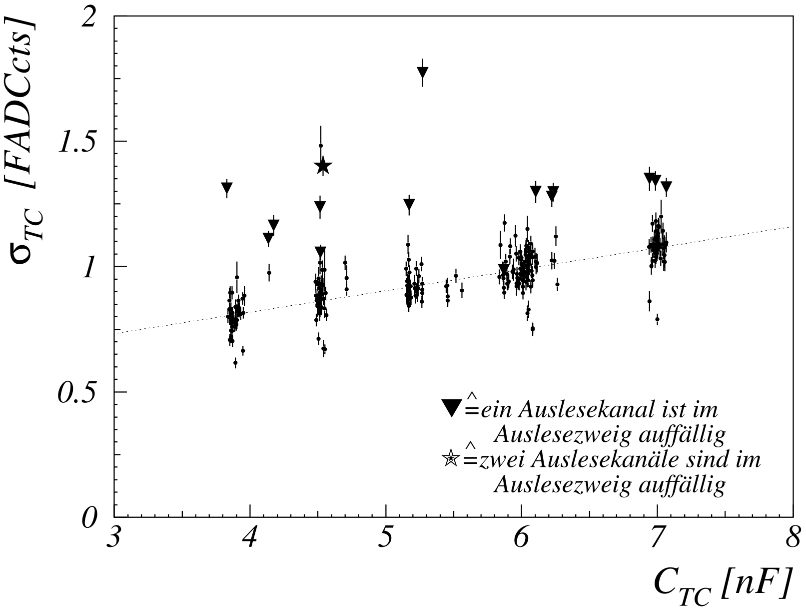


Abbildung 4.12: *Funktionaler Zusammenhang zwischen dem Rauschpegel σ_{TC} und der Kapazität C_{TC} der Triggerzellen; Triggerzellen, bei denen einer der Kanäle, die zum Signal beitragen im Auslesezweig enen anomal hohen Rauschpegel hat sind durch ein ▼ markiert; haben zwei der Auslesekanäle, deren Signale zu einer Triggerzelle zusammengefaßt sind im Auslesezweig einen anomal hohen Rauschpegel, werden diese Triggerzellen durch ein ★ markiert*

4.5.3 Zeitliche Stabilität der Rauschpegel im Triggerzweig

Das Rauschen des Auslesezweiges läßt sich in guter Näherung als weißes Rauschen beschreiben (s. Abschn. 4.4.3). In diesem Abschnitt wird analog zu Abschnitt 4.4.3 der χ^2-Test angewandt, um eine Aussage darüber zu treffen, inwieweit im Triggerzweig weißes Rauschen den Störpegel dominiert. Dazu werden 7 Messungen der Rauschpegel von Triggerzellen untersucht, die über einen Zeitraum von 6 Monaten verteilt sind.

Abbildung 4.13 zeigt das Resultat des χ^2-Tests, der auf die Rauschpegel von Triggerzellen angewandt wurde. Ebenso wie in Abbildung 4.9 ist auch in Abbildung 4.13 die theoretisch erwartete Verteilung von χ^2/dof dem Histogramm überlagert. Es ist zu erkennen, daß der Mittelwert der Verteilung deutlich größer als eins ist. Weiterhin fällt auf die weitaus breitere Verteilung der Werte von χ^2/dof auf, als dieses in der Theorie vorhergesagt wird. Daraus ist zu folgern, daß im Triggerzweig auch nicht-weiße Rauschanteile merklich zum Rauschpegel der TCs beitragen. Dieses Ergebnis ist nicht verwunderlich. Bereits in Abbildung 4.3 fiel die Erhöhung der berechneten Standardabweichungen der Signalhöhenverteilung bei den BCs auf, an denen nicht das Signalmaximum vorliegt. Dieses wurde durch den Einfluß äußerer Störquellen auf σ_{TC} erklärt.

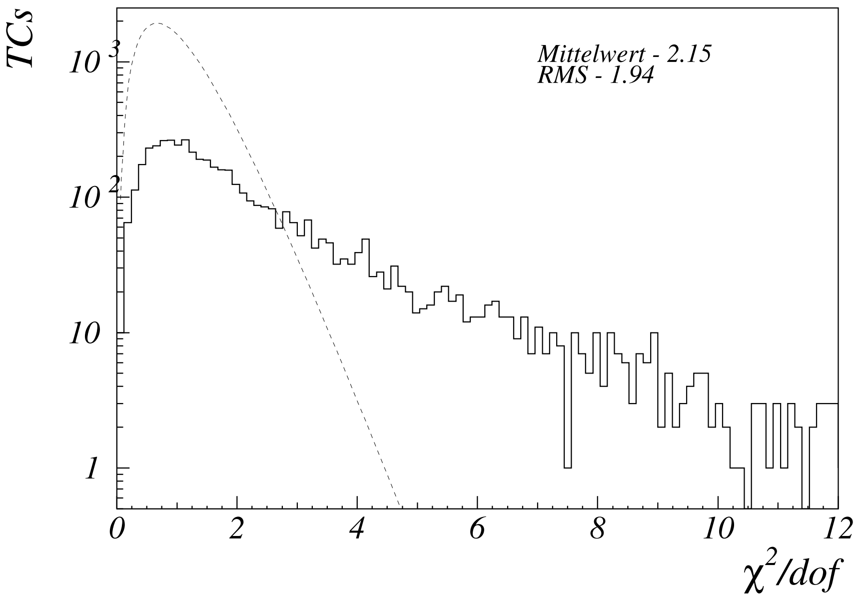


Abbildung 4.13: *χ^2-Verteilung der zeitlichen Variation der Rauschpegel im Triggerzweig für alle TCs des LAr-Kalorimeters (offenes Histogramm); als gestrichelte Kurve ist die χ^2-Verteilung überlagert, die unter der Annahme einer statistischen Verteilung von σ_{TC} zu erwarten ist*

Es ist von Interesse, die Größe der zeitlichen Schwankung des Rauschpegels der Triggerzellen festzustellen. Große zeitliche Schwankungen von σ_{TC} bewirken bei unveränderten Schwellenwerten des Triggers große Schwankungen in der Rate akzeptierter Ereignisse. In dieser Analyse wurde die Standardabweichung $RMS_{\sigma_{TC}}$ der Verteilung der gemessenen Werte von σ_{TC} im Zeitraum von 6 Monaten untersucht.

Abbildung 4.14 zeigt die Werte von $RMS_{\sigma_{TC}}$ normiert auf den mittleren Rauschpegel $\overline{\sigma_{TC}}$ einer Triggerzelle im betrachteten Zeitraum. Der Mittelwert von $\frac{RMS_{\sigma_{TC}}}{\overline{\sigma_{TC}}}$ liegt bei ca. 10 %. Die Rauschpegel von TCs können somit auch mit den nicht-weißen Beiträgen als zeitlich stabil angenommen werden.

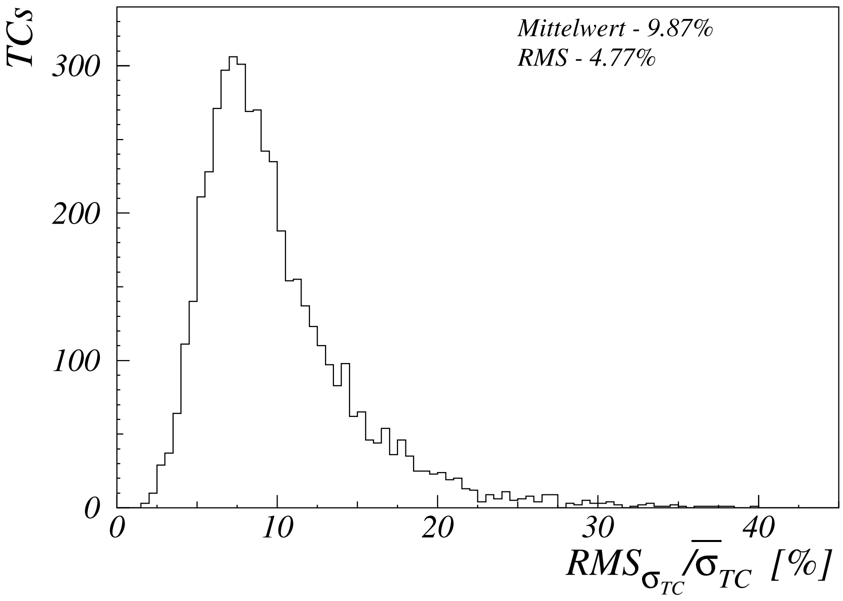


Abbildung 4.14: *Standardabweichung* $RMS_{\sigma_{\mathrm{TC}}}$ *der Rauschpegel von Triggerzellen vom mittleren Rauschpegel* $\overline{\sigma_{\mathrm{TC}}}$ *des untersuchten Zeitraums von 7 Monaten, normiert auf* $\overline{\sigma_{\mathrm{TC}}}$

Kapitel 5

Untersuchung der Änderungen an der Ausleseelektronik des H1-LAr-Kalorimeters

Wie Kapitel 4 zu entnehmen ist, reduziert das elektronische Rauschen der Ausleseelektronik des LAr-Kalorimeters die Möglichkeit, neue physikalische Erkenntnisse zu gewinnen.

Durch die zufälligen Signaleinträge, die dem Signal eines Ereignisses überlagert sind, wird die Energieauflösung verringert. Dieses führt in Analysen zu einer Erhöhung der statistischen Unsicherheiten.

Ebenso wird durch das Rauschen der Ausleseelektronik und die den Signalen überlagerten Pedestals bei der Datennahme stets in allen Auslesekanälen ein Signal registriert. Es ist nicht sinnvoll, die Einträge aller Auslesezellen zu speichern, da ein Großteil keine Signale des physikalischen Ereignisses enthält. Daher wird das in einem Auslesekanal registrierte Signal nur gespeichert, wenn es größer als ein festgelegter Schwellenwert ist. Dieses Verfahren wird als ,,Nullpunktsunterdrückung" bezeichnet. Es werden bei der Nullpunktsunterdrückung NPU Schwellenwerte in Abhängigkeit vom Rauschpegel σ_{Zelle} der Auslesekanäle gewählt. Diese betragen üblicherweise im CB $2\sigma_{\text{Zelle}}$, im FB $2{,}5\sigma_{\text{Zelle}}$ und im IF/OF $3\sigma_{\text{Zelle}}$. Aus Gründen der Signallinearität werden auch Signale gespeichert, die kleiner als das Negative der Schwellen sind [52].

Bei Energiedepositionen, die über viele Zellen verteilt sind (Jets) oder bei Teilchen niedriger Energie, finden sich häufig geringe deponierte Energien in einer Auslesezelle. Nach Anwendung der NPU wird ein Teil des Signals verloren, da einige Auslesezellen zu wenig deponierte Energie enthalten, um die Schwellenwerte zu übersteigen. Es ergibt sich somit eine Verfälschung registrierter Signale. Der Anteil des nicht registrierten Signals ist dabei von der Art und Energie des primären Teilchens abhängig. Niedrige Rauschpegel bewirken an dieser Stelle niedrigere Schwellenwerte bei der NPU. Hierdurch wird ein höherer Anteil an Signal registriert und die Verfälschung der gemessenen Energiedepositionen verringert.

Im Triggerzweig des LAr-Kalorimeters wird die Signalsumme großer Bereiche des Kalorimeters mit festgelegten Schwellenwerten verglichen. Nur wenn die Signalsumme den festgelegten Schwellenwert übersteigt, wird das zugehörige Triggerelement gesetzt. Bei Triggern, die auf die Energiedepositionen im LAr-Kalorimeter ansprechen, ist das Nicht-setzen der Triggerelemente gleichbedeutend damit, daß das Ereignis verworfen wird. Es wird durch die Schwellenwerte erreicht, daß die Datennahme nicht unnötig unterbrochen wird, nur weil elektronisches Rauschen ein physikalisches Ereignis vortäuscht. Die Schwellenwerte sind daher auf Höhen eingestellt, die kaum vom Rauschen in den BTs erreicht werden. Ereignisse, in denen wenig Energie im LAr-Kalorimeter deponiert wird, werden häufig nicht erfaßt, da das Signal der Energiedeposition die Schwellenwerte des Triggerzweiges nicht überschreitet. Die Sensitivität auf niederenergetische Teilchen hängt dabei stark von den Schwellenwerten ab [53]. Niedrige Schwellen sind für effiziente Trigger auf diese Teilchen notwendig.

Um Verbesserungen in den drei angesprochenen Punkten zu erhalten, ist es notwendig, die Störpegel in der Ausleseelektronik des LAr-Kalorimeters zu senken.

5.1 Möglichkeiten und Risiken des Upgrade-Programms

Zu Beginn des H1-Experimentes wurde versucht, die Einwirkung äußerer Störquellen in der Auslese der Signale zu unterbinden. Dieses ist im Auslesezweig soweit gelungen, daß derzeit nur noch das weiße Rauschen der Ausleseelektronik merklich zum Störpegel beiträgt (s. Abschn. 4.4.3). Auch im Triggerzweig dominiert das weiße Rauschen den Störpegel (s. Abschn. 4.5.1). Daher soll das Rauschen der Ausleseelektronik selber reduziert werden. Nach Formel 4.3 bieten sich dazu verschiedene Möglichkeiten.

Es bietet sich an, den Vorwiderstand R_s der Analogkarten zu entfernen, sowie einen neuen JFET mit größerer Steilheit gm in den Vorverstärker einzubauen. Formel 4.3 zeigt, daß die Rauschpegel linear von R_s abhängen und invers proportional zu gm sind. Die Vorwiderstände wurden beim Aufbau des Experimentes eingebaut, um die Ausleseelektronik vor Schäden durch Hochspannungsüberschläge in den Auslesezellen zu schützen. Es hat sich jedoch gezeigt, daß die Hochwiderstandsbeschichtung der HV-Platten sowie die Kapazität der Kabel zwischen den Ausleseplatten und den Analogkarten Spannungsspitzen soweit herabdämpfen, daß die Widerstände in allen Bereichen außer dem CBH[1] entfernt werden können [54]. Beim Aufbau des H1-Experimentes wurden die zu dem Zeitpunkt besten verfügbaren JFETs[2] in die Vorverstärker integriert. Aufgrund fortschreitender Technik ist eine Neugestaltung der Vorverstärker mit einem JFET[3] mit größerem gm als Eingangstransistor möglich.

Um die Auswirkungen einer an den beiden Stellen veränderten Ausleseelektronik zu testen, wurden Spice-Simulationen[4] durchgeführt. Ebenso wurde in einzelnen Bereichen des LAr-Kalorimeters gegen Ende 1995 die Ausleseelektronik ausgetauscht (s. Anhang A). Es

---

[1] Im CBH sind die HV-Platten nur mit Kupfer beschichtet (s. Abschn. 2.2.1). Der HV-Schutz erfolgt in diesen Sektionen durch Neonglimmlampen im Kryostaten und die Vorrichtungen auf der Analogkarte (s.Ãbschn. 2.4). In diesen Sektionen müssen kleine Vorwiderstände auf den Analogkarten bestehen bleiben.

[2] JFETs des Typs 2 SK 372 von Toshiba [55]

[3] JFETs des typs NJ3600 von InterFet [56]

[4] Das Programmpaket Spice dient der Simulation elektronischer Netzwerke

zeigte sich, daß die Rauschpegel der Ausleseekanäle bis zu 50 % reduziert werden können, wenn beide Änderungen in der Ausleseelektronik durchgeführt werden [53]. Daher wurde entschieden, die Ausleseelektronik in den Kalorimeterbereichen CB und FB zu erneuern.

Im Frühjahr 1996 wurde die Ausleseelektronik des BBEs komplett mit neuen Vorverstärkern ausgerüstet. Die Vorwiderstände wurden von den Analogkarten dieses Kalorimeter-Rades sowie von Teilen der Analogkarten des CB1E und CB2E entfernt. Bei den ANCDs des CBH erfolgte ein Austausch der Vorwiderstände von 20 Ω gegen andere der Größen 1 Ω bzw. 2 Ω. Durch die Bestückung der ANCDs mit zwei unterschiedlich großen Vorwiderständen sollte getestet werden, wie sich der Unterschied auf den Rauschpegel der Ausleseelektronik und den Schutz vor Schäden auswirkt. Anhand des Ergebnisses war zu entscheiden, welcher Widerstand in weiteren Phasen des Upgrades zum Einsatz kommen sollte.

In einer zweiten Phase zu Beginn des Jahres 1997 wurden die Vorverstärker in einem Teil der Ausleseelektronik des CB1E[5] ausgetauscht. Auch hier wurden zusätzlich die Vorwiderstände der Analogkarten entfernt. Es wurden dazu die im H1-Experiment benutzten Analogkarten des zu erneuernden Bereiches im CB1E in der datennahmefreien Zeit ausgebaut, zum Max-Planck-Institut für Physik in München transportiert und dort umgerüstet. Im Rahmen dieser Arbeit wurde an den Tests der neubestückten Analogkarten sowie ihrem Einbau teilgenommen. Hierauf wird im folgenden Abschnitt eingegangen. Die beiden Bereiche, in denen die Ausleseelektronik in den ersten beiden Phasen des Upgrades mit neuen Vorverstärkern ausgerüstet wurde, decken ein zusammenhängendes Gebiet von acht BTs[6] ab. In der datennahmefreien Zeit im Winter 1997/98 wird abschließend eine umfassende Erneuerung der Ausleseelektronik des CBs und des FBs vorgenommen. Die Änderungen die in diesem Zeitraum an der Ausleseelektronik durchgeführt werden, sind in Anhang A detailliert aufgeführt. Der zeitliche Ablauf des gesamten Upgrade-Programms findet sich in tabellarischer Form im Anhang A.

5.1.1 Test der neuen Ausleseelektronik

Aufbau des Meßstandes

Zur Erprobung der Elektronik des LAr-Kalorimeters ist am Max-Planck-Institut für Physik in München ein Meßstand vorhanden. Dieser enthält eine mit Orginalbauteilen bestückte Auslese- und Triggerkette, die derjenigen am H1-Detektor entspricht (s. Abb. 5.1). Vom Umfang der Eingangskanäle her, ist die Meßapparatur auf eine Analogbox beschränkt. Es können somit gleichzeitig maximal 8 Analogkarten mit insgesamt 128 Kanälen getestet werden. Die Kapazität der Auslesezellen wird durch Stecker mit aufgelöteten Kapazitäten simuliert. Diese werden im folgenden als „Steckkapazitäten“ bezeichnet. Die Steckkapazitäten werden, entsprechend den Signalkabeln im Experiment, mit dem Signaleingang der ANCDs verbunden. Um die Abhängigkeit der Rauschpegel der Auslesekanäle von der „Zellkapazität“ zu untersuchen, stehen verschiedene Sätze von Steckkapazitäten mit

---

[5] In der Triggerregion BT-θ13

[6] Es handelt sich um die Triggerregion BT-θ13. Diese entspricht dem Winkelbereich von ca. $137° - 151°$

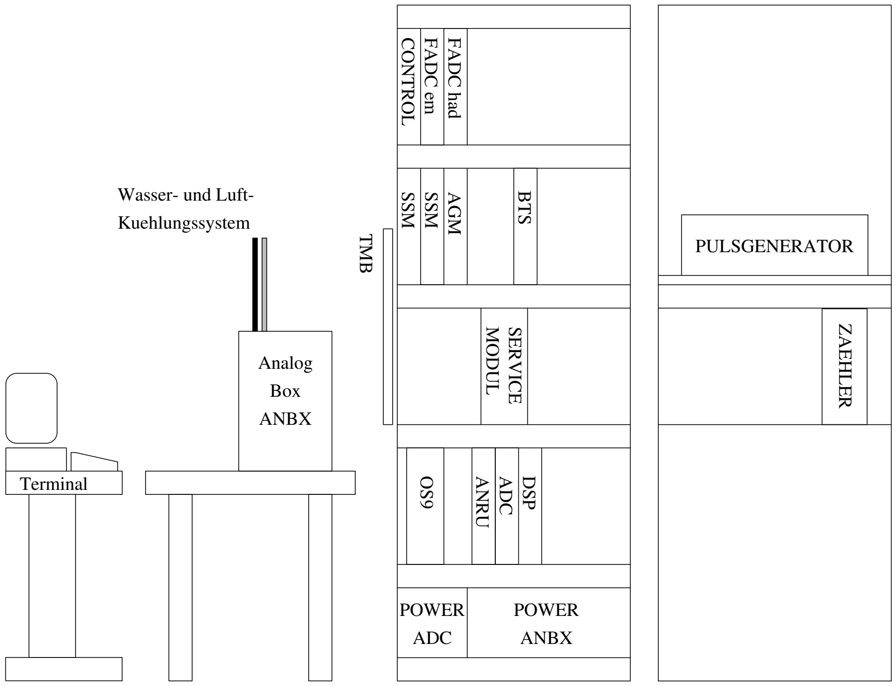


Abbildung 5.1: *Skizze des Meßstandes am MPI in München, an welchem die Tests der erneuerten Ausleseelektronik vorgenommen wurden [57]*

unterschiedlich großen, aufgelöteten Kapazitäten zur Verfügung.

Datennahme

Die Datennahme erfolgt, gesteuert durch ein OS9-System. Am Ende des Triggerzweiges (s. Abschn. 2.4.1) digitalisieren die FADCs die ausgelesenen Signale alle 96 ns[7]. Dabei wird ein Signalspektrum mit insgesamt 30 Zeitpunkten um das erwartete Signalmaximum aufgezeichnet. Es ist somit möglich, Unterschiede in den Signallaufzeiten bis zum Signalmaximum zwischen der alten und der neuen Ausleseelektronik zu bestimmen.

Die Signalauslese im Auslesezweig (s. Abschn. 2.4.2) wird zu einem festgelegten Zeitpunkt durch ein simuliertes L 1-Haltesignal gestartet und danach wie am H1-Detektor durchgeführt. Es wurden pro Messung für jeden Kanal 1000 Meßwerte aufgezeichnet. Die Standardabweichung der Signalhöhenverteilung entspricht dabei dem Rauschpegel eines Auslesekanals.

Die Steckkapazitäten werden bei einer Messung für alle Auslesekanäle gleich groß gewählt. Dadurch kann vom gemessenen Rauschpegel der Auslesekanäle auf den Zustand der Auslesekanäle geschlossen werden. Es ist zu erwarten, daß bei gleich großen Steckkapazitäten in allen Auslesekanälen ungefähr gleich große Rauschpegel gemessen werden. Kanäle mit deutlich erhöhtem, oder zu niedrigem Rauschpegel fallen als möglicherweise defek-

---

[7] Entsprechend dem Taktzyklus der HERA-Uhr

te Kanäle auf.

Um Fehlmessungen aufgrund nicht idealer Erdung der Meßapperatur, unterschiedlicher Temperatur der Analogkarten oder fehlerhafter Kontakte beim Aufbau des Meßstandes zu identifizieren, wurde die Messung für eine ANCD mehrfach wiederholt. Dieses bot zudem die Möglichkeit, die Stabilität der neuen Elektronik zu testen.

Abbildung 5.2 zeigt typische Ergebnisse einer Meßreihe. Zu Beginn und am Ende der Meßreihe wird eine Messung mit Steckkapazitäten von 0 nF durchgeführt. In diesen beiden Messungen wird der Rauschpegel der Ausleseelektronik ohne das Rauschsignal durch den kapazitiven Anteil gemessen. Es ist zu erwarten, daß die Rauschpegel, die in beiden Messungen bestimmt werden, übereinstimmen. Ein Vergleich der beiden gemessenen Rauschpegel ermöglicht daher Änderungen im Rauschen der Meßelektronik festzustellen, die während der Meßreihe aufgetreten sind.

Die beiden Kanäle auf der rechten Seite von Abbildung 5.2 verhalten sich weitgehend gleich. Dieses ist aufgrund der jeweils gleich großen Steckkapazitäten zu erwarten. Die Kanäle auf der linken Seite zeigen hingegen ein anormales Verhalten. Bei dem oberen Kanal ist eine zu starke Abhängigkeit des Rauschpegels von der Kapazität zu erkennen. In diesem Fall scheint ein defektes Bauteil vorzuliegen. Der untere Kanal zeigt keine Ände-

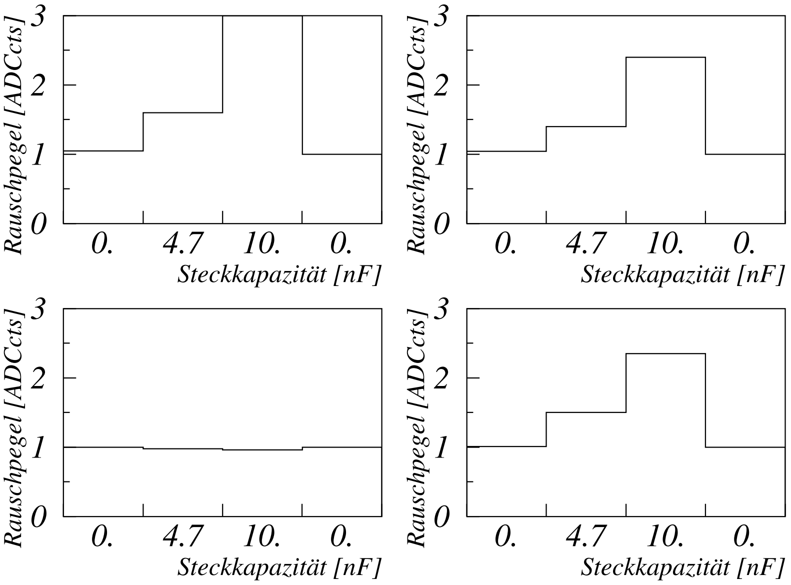


Abbildung 5.2: *Rauschpegel von vier Auslesekanälen, die bei den Testmessungen auftreten; links sind zwei Kanäle mit Defekten, rechts zwei „gute" Kanäle zu sehen; es ist zu erkennen, daß sich die rechten Kanäle weitgehend gleich verhalten, was auch zu erwarten ist; bei den linken Kanälen zeigt der obere eine zu starke, der untere gar keine Kapazitätsabhängigkeit der Rauschpegel. Bei diesen Kanälen liegen Defekte auf den Analogkarten vor.*

rung des Rauschpegels bei Steckkapazitäten größer 0, es wird immer nur das Rauschen der Meßelektronik registriert. Dieses bedeutet, daß das von der Kapazität abhängige Rauschsignal nicht durch die Analogkarte geleitet wird, was z.B. bei einem fehlerhaften Kontakt auftritt.

Kanäle, die als defekt identifiziert wurden, konnten direkt mittels eines Tastkopfes untersucht werden. Hierdurch war es möglich, den Defekt auf der Analogkarte einzugrenzen, was eine schnellere Behebung der Mängel erlaubte.

Ergebnisse der Tests

Bei der ersten Meßreihe der mit neuen Vorverstärkern ausgestatteten Analogkarten wiesen 7 % der Auslesekanäle fehlerhafte Kontakte auf. Diese Fehler konnten durch Nacharbeiten behoben werden. Bei vielen Kanälen, die durch erhöhtes Rauschen auffielen, wurde dieses durch einen fehlerhaften Shaper auf der Analogkarte hervorgerufen (s. Absch. 2.4.2). Hier werden erste Ausfallserscheinungen der Elektronik offensichtlich, die zu Beginn des Experimentes eingebaut wurde.

Einige Kanäle zeigten erst bei der zweiten oder dritten Messung einen auffällig hohen Rauschpegel. Dieses ist dadurch zu erklären, daß wenig stabile Bauteile durch die Beanspruchung der Analogkarten wärend der Tests defekt wurden. Durch die wiederholten Messungen konnte somit eine weitgehend von wenig stabilen oder auch defekten Bauteilen befreite Gesamtheit zu selektiert werden (s. Abschn. 5.4).

Weitere Informationen zu den Tests der Analogkarten in München finden sich in [57].

5.2 Auswirkungen des Upgrades im Auslesezweig

In den vorhergehenden Abschnitten wurden die Erwartungen an den Upgrade dargestellt und die Tests beschrieben, die erfolgt sind, um in der zweiten Phase des Upgrade-Programms ein möglichst gutes Ergebnis zu erzielen. Im folgenden Abschnitt wird die in Untersuchungen am H1-Detektor bestimmten Änderung

$$\frac{\sigma_{\mathrm{Zelle}_{\mathrm{neu}}} - \sigma_{\mathrm{Zelle}_{\mathrm{alt}}}}{\sigma_{\mathrm{Zelle}_{\mathrm{alt}}}}$$

mit:

$\sigma_{\mathrm{Zelle}_{\mathrm{neu/alt}}}$ $\hat{=}$ Rauschpegel der Auslesekanäle nach/vor der Erneuerung der Ausleseelektronik im Rahmen des Upgrades

der Rauschpegel der Auslesekanäle dargestellt. Hierzu werden zunächst die Änderungen des Rauschpegels in den einzelnen Gruppen von Kanälen betrachtet, in denen die Ausleseelektronik unterschiedlich verändert wurde. Danach erfolgt ein Vergleich mit den theoretisch erwarteten Änderungen der Rauschpegel.

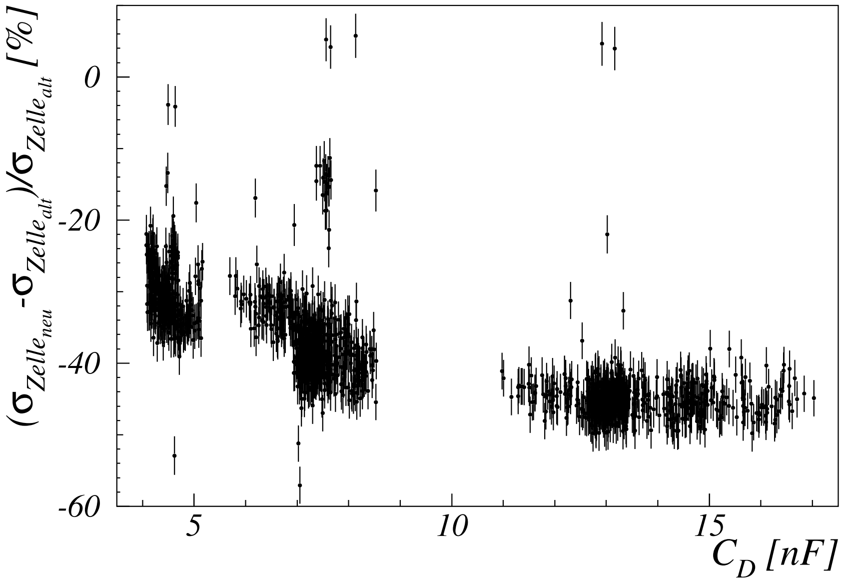


Abbildung 5.3: *Änderung* $\frac{\sigma_{\mathrm{Zelle}_{neu}}-\sigma_{\mathrm{Zelle}_{alt}}}{\sigma_{\mathrm{Zelle}_{alt}}}$ *des Rauschpegels der Auslesekanäle durch die Erneuerung der Vorverstärker und das gleichzeitige Entfernen der Vorwiderstände der Analogkarten in Abhängigkeit von der Kapazität* C_D *der Auslesezellen; dargestellt sind die Wertepaare aller Auslesekanäle des BBEs und CB1E(*θ13*)*

5.2.1 Bereiche neuer Vorverstärker

Abbildung 5.3 zeigt die Änderung $\frac{\sigma_{\mathrm{Zelle}_{\mathrm{neu}}}-\sigma_{\mathrm{Zelle}_{\mathrm{alt}}}}{\sigma_{\mathrm{Zelle}_{\mathrm{alt}}}}$ des Rauschpegels der Auslesekanäle durch den Einbau neuer Vorverstärker und das gleichzeitige Entfernen der Vorwiderstände auf der Analogkarte in Abhängigkeit von der Kapazität C_D der Auslesezellen. Aufgetragen sind die Wertepaare für alle Auslesekanäle des BBE sowie des Bereiches im CB1E, in dem neue Vorverstärker eingesetzt wurden. Es ist zu erkennen, daß $\frac{\sigma_{\mathrm{Zelle}_{\mathrm{neu}}}-\sigma_{\mathrm{Zelle}_{\mathrm{alt}}}}{\sigma_{\mathrm{Zelle}_{\mathrm{alt}}}}$ bei kleinen Werten von C_D ca. -28 % beträgt und bei großen Werten von C_D auf ca. -45 % abnimmt. Der Mittelwert liegt bei ca. -37 %. Dieser Zusammenhang zwischen $\frac{\sigma_{\mathrm{Zelle}_{\mathrm{neu}}}-\sigma_{\mathrm{Zelle}_{\mathrm{alt}}}}{\sigma_{\mathrm{Zelle}_{\mathrm{alt}}}}$ und C_D ist auf den Term σ_0 (s. Formel 4.4) des Rauschpegels eines Auslesekanals zurückzuführen. Die Ursache für den Term σ_0 liegt in der hinteren Ausleseelektronik (s. Abschn. 4.4.2). Daher sollte σ_0 durch die Änderungen an der Ausleseelektronik im Rahmen des Upgrades nicht verändert werden.

Die Abhängigkeit der Reduktion der Rauschpegel von C_D ist der Grund für die Entscheidung, in der dritten Upgrade-Phase nur in den Auslesekanälen neue Vorverstärker einzubauen, bei denen C_D mindestens 5 nF beträgt.

Es sind in Abbildung 5.3 einige Auslesekanäle zu erkennen, bei denen $\frac{\sigma_{\mathrm{Zelle}_{\mathrm{neu}}}-\sigma_{\mathrm{Zelle}_{\mathrm{alt}}}}{\sigma_{\mathrm{Zelle}_{\mathrm{alt}}}}$ deutlich größer ist als bei dem Hauptteil der Auslesekanäle. Diese auffälligen Auslesekanäle gehören zum BBE. Eine mögliche Erklärung ist, daß während der ersten Upgrade-Phase die Tests auf defekte Auslesekanäle noch einen deutlichen Anteil defekter Analogkarten unbemerkt passieren ließen.

5.2.2 Bereiche entfernter Vorwiderstände

Wie erwähnt, wurden in einigen Bereichen des CB1E und CB2E die Vorwiderstände der Analogkarten entfernt. Abbildung 5.4/oben zeigt die Größe $\frac{\sigma_{\text{Zelle}_{\text{neu}}}-\sigma_{\text{Zelle}_{\text{alt}}}}{\sigma_{\text{Zelle}_{\text{alt}}}}$ für die Auslesekanäle dieser Bereiche in Abhängigkeit von C_D. Es ist zu erkennen, daß die Rauschpegel der Auslesekanäle im Mittel um 14 % verringert sind.

Die gleichmäßig guten Ergebnisse in allen Kanälen zeigen, daß das Auslöten der Widerstände und die damit verbundene Beanspruchung der Analogkarten ohne Schäden anzurichten möglich ist.

5.2.3 Bereiche reduzierter Vorwiderstände

Abbildung 5.4/unten zeigt die Größe $\frac{\sigma_{\text{Zelle}_{\text{neu}}}-\sigma_{\text{Zelle}_{\text{alt}}}}{\sigma_{\text{Zelle}_{\text{alt}}}}$ für die Auslesekanäle der hadronischen Sektionen des CB, in denen die Vorwiderstände der Analogkarten auf 1 Ω bzw. 2 Ω reduziert wurden, in Abhängigkeit von C_D.

Es ist zu erkennen, daß für viele Auslesekanäle der Rauschpegel in Abhängigkeit von C_D verringert ist. Dennoch gibt es einen deutlichen Anteil von Auslesekanälen, bei denen $\frac{\sigma_{\text{Zelle}_{\text{neu}}}-\sigma_{\text{Zelle}_{\text{alt}}}}{\sigma_{\text{Zelle}_{\text{alt}}}}$ größer Null ist, die also nach der Verringerung der Vorwiderstände einen höheren Rauschpegel haben als vorher. Die Auslesekanäle, bei denen der Rauschpegel nach der Verringerung der Vorwiderstände erhöht ist, stammen großteils aus einer von drei Analogkarten (s. Abb. 5.2.3/unten). Diese Analogkarten sind offensichtlich fehlerhaft bearbeitet worden, anders lassen sich so viele defekte Auslesekanäle auf einzelnen Analogkarten nicht erklären.

Die Abhängigkeit der Größe $\frac{\sigma_{\text{Zelle}_{\text{neu}}}-\sigma_{\text{Zelle}_{\text{alt}}}}{\sigma_{\text{Zelle}_{\text{alt}}}}$ von C_D bei den Kanälen, die eine Reduktion des Rauschpegels nach der Verringerung der Vorwiderstände zeigen, läßt sich ebenso wie in Abschnitt 5.2.1 durch den Einfluß von σ_0 erklären. Bei kleinen Kapazitäten dominiert σ_0 den Rauschpegel, daher können dort kaum Verbesserungen erzielt werden. Bei bearbeiteten Auslesezellen mit großem C_D ist jedoch eine Reduktion der Rauschpegel von im Mittel 9 % zu erkennen.

Die Kanäle der Bereiche in denen die Vorwiderstände der Analogkarten auf 1 Ω bzw. 2 Ω abgeändert wurden, sind in Abbildung 5.4/unten durch unterschiedliche Symbole kenntlich gemacht:

● $\hat{=}$ Auslesekanäle mit 1 Ω Vorwiderstand auf der ANCD
★ $\hat{=}$ Auslesekanäle mit 2 Ω Vorwiderstand auf der ANCD

Ein Vergleich der Rauschpegel beider Gruppen ist aufgrund der hohen Anzahl defekter Kanäle schwer möglich. Besonders bei kleinen Werten von C_D ist keine klare Trennung

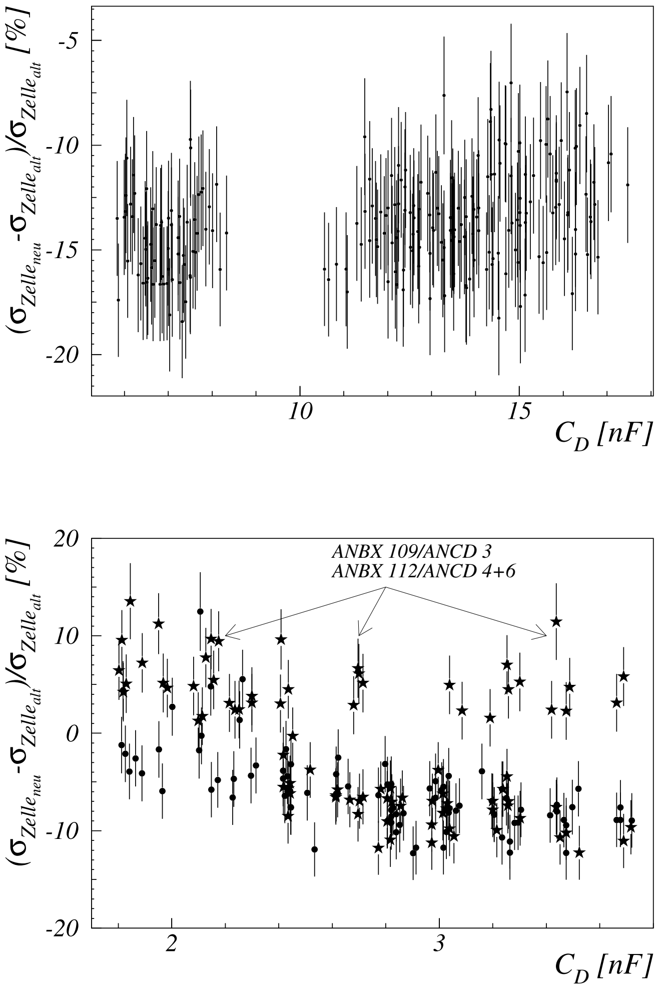


Abbildung 5.4: *Änderung* $\frac{\sigma_{\text{Zelle}_{neu}}-\sigma_{\text{Zelle}_{alt}}}{\sigma_{\text{Zelle}_{alt}}}$ *des Rauschpegels der Auslesekanäle der Bereiche veränderter Vorwiderstände in Abhängigkeit von der Kapazität* C_D *der Auslesezellen; oben: Bereiche entfernter Vorwiderstände (CBE); unten: Bereiche reduzierter Vorwiderstände (CBH), wobei* ● *Bereiche mit aktuell 2* Ω *und* ★ *Bereiche mit aktuell 1* Ω *Vorwiderstand auf den Analogkarten bezeichnet*

zwischen Auslesekanälen möglich, die fehlerhaft bearbeitet wurden und anderen, bei denen nur eine leichte Reduktion des Rauschpegels erfolgt. Daher werden nur die Rauschpegel von Auslesekanälen verglichen, bei denen C_D größer als 2,6 nF ist. Die mittlere Reduktion der Rauschpegel beträgt:

-8,0 % ± 0,44 %	bei den Auslesekanälen mit 1 Ω Vorwiderstand auf den ANCDs
-7,9 % ± 0,38 %	bei den Auslesekanälen mit 2 Ω Vorwiderstand auf den ANCDs

Im Rahmen der Fehler ist die Reduktion der Rauschpegel in beiden Gruppen von Auslesekanälen miteinander verträglich.

5.2.4 Vergleich von Erwartung und Erfolg

Der Bereich des CB1E bietet die Gelegenheit zu einer Gegenüberstellung der erwarteten Reduktion der Rauschpegel durch den Upgrade und der erreichten Verbesserungen. Nur in dieser Sektion gibt es unbearbeitete Auslesekanäle, Kanäle bei denen auf der Analogkarte die Vorwiderstände entfernt wurden und Kanäle mit zusätzlich neuen Vorverstärkern. Die Auswirkung der unterschiedlichen Änderungen an der Ausleseelektronik auf den Rauschpegel der Auslesekanäle kann nur sinnvoll bei Kanälen einer Sektion verglichen werden. Ein Versuch, die Rauschpegel der Kanäle aus unterschiedlichen Sektionen miteinander zu vergleichen, scheitert daran, daß die Rauschpegel der Auslesekanäle mit gleichem C_D in verschiedenen Sektionen leicht unterschiedlich sind.

Zum Vergleich Rauschpegel der drei unterschiedlichen Gruppen von Kanälen darf nur der kapazitätsabhängige Teil σ_c (s. Formel 4.4) des Rauschens betrachtet werden. Der Beitrag σ_0 stammt komplett aus der hinteren Ausleseelektronik (s. Abschn. 4.4.2) und wird somit

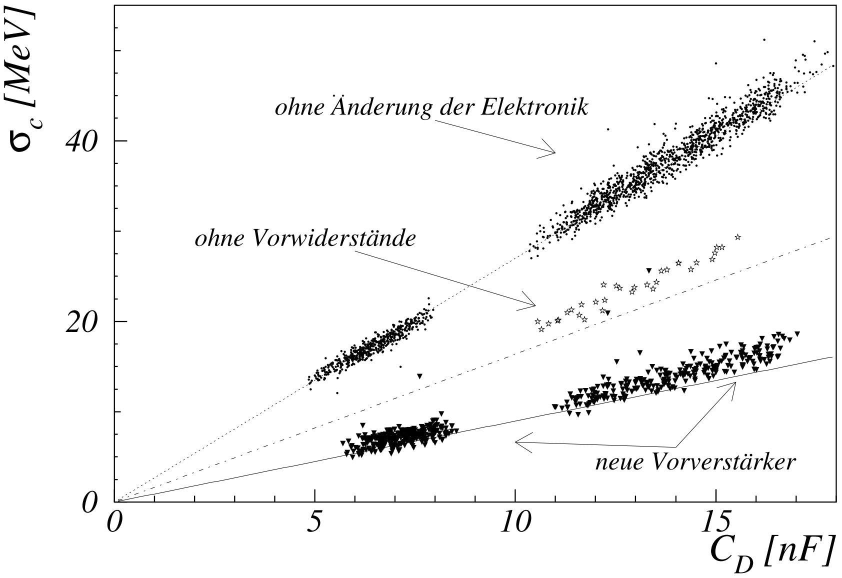


Abbildung 5.5: *Gegenüberstellung des kapazitätsabhängigen Terms σ_c des Rauschpegels der Auslesekanäle nach den verschiedenen Änderungen in der Ausleseelektronik (Symbole) in Abhängigkeit von der Kapazität C_D der Auslesezellen; überlagert sind die Geraden, welche dem theoretisch erwarteten, kapazitätsabhängigen Anteil σ_c des Rauschpegels der drei Gruppen von Auslesekanälen entsprechen*

durch die Erneuerungen nicht beeinflußt.

In Abbildung 5.5 ist σ_c für alle Auslesekanäle der drei Gruppen in Abhängigkeit von C_D aufgetragen. Die zu unterschiedlichen Gruppen gehörenden Auslesekanäle sind durch unterschiedliche Symbole kenntlich gemacht:

● $\hat{=}$ keine Änderungen in der Ausleseelektronik
★ $\hat{=}$ Vorwiderstände auf den ANCDs entfernt
▼ $\hat{=}$ Vorverstärker erneuert und Vorwiderstände auf den ANCDs entfernt

Der nach Formel 4.3 erwartete Zusammenhang zwischen σ_c und C_D für die drei Gruppen von Kanälen ist jeweils als Gerade den Datenpunkten überlagert. Die Einheiten der gemessenen und der berechneten Rauschpegel müssen dazu ineinander umgerechnet werden. Der Umrechnungsfaktor wird durch die Anpassung des theoretischen Gradienten $\frac{d\sigma_c}{dC_D}$ an die Datenpunkte der Auslesekanäle bestimmt, in denen keine Änderung in der Ausleseelektronik erfolgt ist.

Es ist zu erkennen, daß die Datenpunkte gut mit den theoretisch erwarteten Rauschpegeln übereinstimmen. Dieses bestätigt den Erfolg des Upgrade-Programmes.

5.2.5 Änderungen im Signal-Rausch-Verhältnis

Zur Erinnerung sei erwähnt, daß das Ziel des Upgrade-Programms eine Verringerung des Rauschpegels der Auslesekanäle ist, um eine Erhöhung des Signal-Rausch-Verhältnisses (SRV) zu erhalten. Die Auswirkung der Änderungen an der Ausleseelektronik auf das Signal, daß bei einer in die Auslesezellen influenzierten Ladung registriert wird, blieb bislang unbetrachtet.

In diesem Abschnitt wird die Änderung

$$\frac{SRV_{\text{neu}} - SRV_{\text{alt}}}{SRV_{alt}}$$

mit:

$SRV_{\text{neu/alt}}$ $\hat{=}$ Signal-Rausch-Verhältnis nach/vor dem Einbau neuer Vorverstärker

des SRV der Auslesekanäle betrachtet.

Abbildung 5.6 zeigt die Größe $\frac{SRV_{\text{neu}} - SRV_{\text{alt}}}{SRV_{alt}}$ für die Auslesekanäle des Bereiches im CB1E, in dem neue Vorverstärker eingebaut wurden in Abhängigkeit von C_D. Überlagert ist eine Kurve, welche dem erwarteten Zusammenhang zwischen $\frac{SRV_{\text{neu}} - SRV_{\text{alt}}}{SRV_{alt}}$ und C_D entspricht, wenn sich als Folge des Upgrades nur der Rauschpegel der Auslesekanäle ändert. Bei der Kurve wird angenommen, daß sich das Signal, welches bei einer beliebigen in die Auslesezellen influenzierten Ladung registriert wird, durch den Upgrade nicht ändert. Dieses ist nicht selbstverständlich, da der neue Vorverstärker anders aufgebaut ist als der alte. Es ist zu erkennen, daß besonders bei großen Werten von C_D der gemessene Wert von $\frac{SRV_{\text{neu}} - SRV_{\text{alt}}}{SRV_{alt}}$ deutlich oberhalb der Erwartung an einen unveränderten Signal-Ladungs-Zusammenhang liegt. Dieses bedeutet, daß neben der Reduktion der Rauschpegel durch

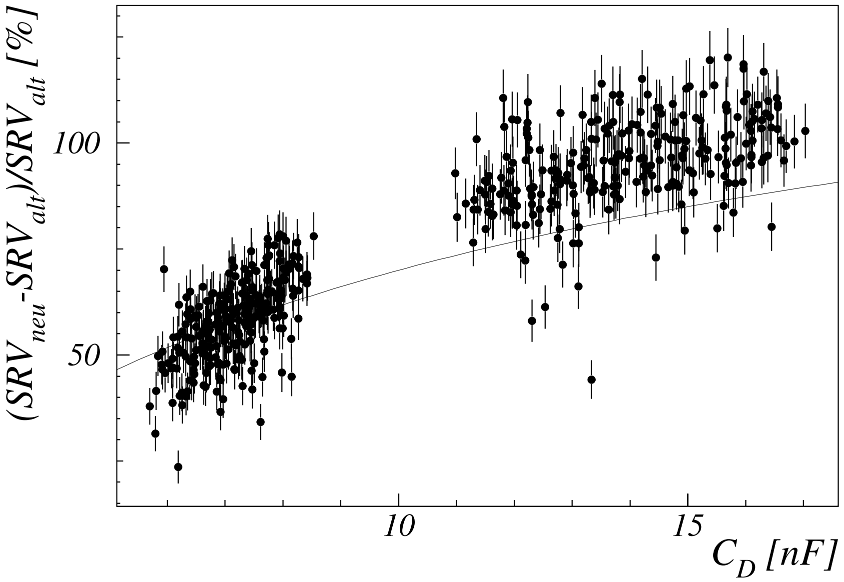


Abbildung 5.6: *Änderung* $\frac{\mathrm{SRV_{neu}}-\mathrm{SRV_{alt}}}{\mathrm{SRV_{alt}}}$ *des Signal-Rausch-Verhältnisses* SRV *in Folge des Upgrades in einem Bereich neuer Vorverstärker (CB1E-*θ*13) in Abhängigkeit von der Kapazität* C_D *der Auslesezellen; überlagert ist der erwartete Zusammenhang zwischen* $\frac{\mathrm{SRV_{neu}}-\mathrm{SRV_{alt}}}{\mathrm{SRV_{alt}}}$ *und* C_D *für den Fall, daß sich durch die neuen Vorverstärker die Rauschpegel der Auslesekanäle ändern, jedoch nicht mehr Signal registriert wird.*

die neuen Vorverstärker, auch höhere Signale bei gleicher influenzierter Ladung in den Auslesezellen registriert werden.

Auffällig ist die Erhöhung des SRV um mehr als 100 % bei Auslesekanälen mit großem C_D. Dieses erhöhte SRV eröffnet gerade bei kleinen deponierten Energien neue Möglichkeiten für physikalische Untersuchungen. Vor dem Upgrade war bei großen C_D das SRV der Auslesekanäle in der Größenordnung von nur 3:1[8]. In den gleichen Auslesekanälen liegt das SRV jetzt bei 6,15 : 1.

In Abschnitt 6.6 wird auf Auswirkungen der Erhöhung des SRV auf die Datennahme bei H1 eingegangen.

5.3 Auswirkungen des Upgrades im Triggerzweig

Es sind im Triggerzweig ähnliche Auswirkungen des Upgrades auf den Rauschpegel wie im Auslesezweig zu erwarten, da der im Rahmen des Upgrades erneuerte Teil der Ausle-

---

[8] Bei einer angenommenen Energiedeposition von 200 MeV pro Auslesezelle

seelektronik in beiden Zweigen vorkommt. In diesem Abschnitt wird die Änderung

$$\frac{\sigma_{\mathrm{TC}_{\mathrm{neu}}} - \sigma_{\mathrm{TC}_{\mathrm{alt}}}}{\sigma_{\mathrm{TC}_{\mathrm{alt}}}}$$

mit:

$\sigma_{\mathrm{TC}_{\mathrm{neu/alt}}}$ $\hat{=}$ Rauschpegel der Triggerzellen nach/vor
den Erneuerungen der Ausleseelektronik im Rahmen des Upgrades

des Rauschpegels von Triggerzellen betrachtet, um die Auswirkung des Upgrades auf die Rauschpegel im Triggerzweig zu quantifizieren.

5.3.1 Bereiche neuer Vorverstärker

Abbildung 5.7 zeigt die Änderung $\frac{\sigma_{\mathrm{TC}_{\mathrm{neu}}} - \sigma_{\mathrm{TC}_{\mathrm{alt}}}}{\sigma_{\mathrm{TC}_{\mathrm{alt}}}}$ des Rauschpegels der Triggerzellen der Bereiche erneuerter Vorverstärker in Abhängigkeit von der Kapazität C_{TC} der Triggerzelle.

Unabhängig von der Höhe der Reduktion des Rauschpegels der TCs ist zu erkennen, daß keine Abhängigkeit zwischen $\frac{\sigma_{\mathrm{TC}_{\mathrm{neu}}} - \sigma_{\mathrm{TC}_{\mathrm{alt}}}}{\sigma_{\mathrm{TC}_{\mathrm{alt}}}}$ und C_{TC} besteht. Diese Abhängigkeit fiel im Auslesezweig auf (s. Abb. 5.3). Die fehlende Abhängigkeit ist durch den im Triggerzweig geringeren σ_0-Term der Rauschpegel zu erklären.

Ebenso ist die große Streuung von $\frac{\sigma_{\mathrm{TC}_{\mathrm{neu}}} - \sigma_{\mathrm{TC}_{\mathrm{alt}}}}{\sigma_{\mathrm{TC}_{\mathrm{alt}}}}$ bei Triggerzellen mit ähnlichem C_{TC} zu erkennen. Diese Streuung wird durch die nicht-weißen Störpegel und die Einwirkung ein-

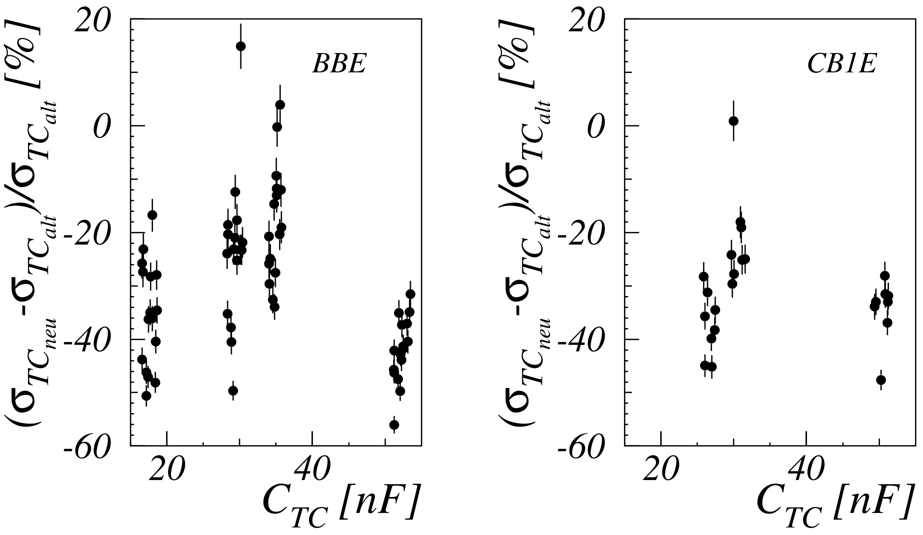


Abbildung 5.7: *Änderung* $\frac{\sigma_{\mathrm{TC}_{\mathrm{neu}}} - \sigma_{\mathrm{TC}_{\mathrm{alt}}}}{\sigma_{\mathrm{TC}_{\mathrm{alt}}}}$ *des Rauschpegels in Triggerzellen der Bereiche erneuerter Vorverstärker in Abhängigkeit von der Kapazität* C_{TC} *der Triggerzellen; links: BBE; rechts: CB1E*

zelner Auslesekanäle mit anormal hohen Rauschpegeln (s. Abschn. 4.5) bewirkt. Da im BBE ein merklicher Anteil der Kanäle einen für C_{TC} anormal hohen Rauschpegel hat (s. Abschn. 5.2.1), ist die Streuung von $\frac{\sigma_{\mathrm{TC}_{\mathrm{neu}}}-\sigma_{\mathrm{TC}_{\mathrm{alt}}}}{\sigma_{\mathrm{TC}_{\mathrm{alt}}}}$ dort größer als im betrachteten Bereich des CB1E.

Durch die nicht-weißen Störpegel kommt es zudem zu einer Verzerrung der Ergebnisse der Untersuchung von $\frac{\sigma_{\mathrm{TC}_{\mathrm{neu}}}-\sigma_{\mathrm{TC}_{\mathrm{alt}}}}{\sigma_{\mathrm{TC}_{\mathrm{alt}}}}$. Die Änderung des weißen Rauschens hat nur Einfluß auf die Höhe des kapazitätsabhängigen Rauschterms. Der teilweise bedeutende kapazitätsunabhängige Term bleibt durch den Upgrade unverändert.

In beiden Bereichen, in denen neue Vorverstärker eingebaut wurden, tritt eine Reduktion der Rauschpegel um ca. 30 % auf. Dieses ist eine geringere Reduktion der Rauschpegel als im Auslesezweig erzielt wird (s. Abschn. 5.2.1). Durch die nicht-weißen Störpegel, die das eigentliche Rauschen überlagern, können im Triggerzweig jedoch keine besseren Ergebnisse erzielt werden.

5.3.2 Bereiche veränderter Vorwiderstände

Die Auswirkung des Upgrades auf den Rauschpegel der Triggerzellen der Bereiche, in denen nur die Vorwiderstände der Analogkarten verändert wurden, lassen sich nur eingeschränkt untersuchen.

In Abbildung 5.8 ist die Größe $\frac{\sigma_{\mathrm{TC}_{\mathrm{neu}}}-\sigma_{\mathrm{TC}_{\mathrm{alt}}}}{\sigma_{\mathrm{TC}_{\mathrm{alt}}}}$ für TCs der hadronischen Bereiche, in denen die Vorwiderstände auf den Analogkarten verringert wurden, in Abhängigkeit von C_{TC} aufgetragen. TCs, die Kanäle aus Analogkarten enthalten, die im Auslesezweig durch anormal hohe Rauschpegel auffallen (s. Abschn. 5.2.3), sind dabei durch ein ▼ besonders gekennzeichnet.

Es fällt die große Streuung von $\frac{\sigma_{\mathrm{TC}_{\mathrm{neu}}}-\sigma_{\mathrm{TC}_{\mathrm{alt}}}}{\sigma_{\mathrm{TC}_{\mathrm{alt}}}}$ auf. Diese Streuung wird zum Teil durch die TCs bewirkt, die Kanäle aus offensichtlich fehlerhaft bearbeiteten ANCDs enthalten. Doch selbst wenn diese durch ein ▼ gekennzeichneten Einträge außer Betracht gelassen werden, ist die Streuung von $\frac{\sigma_{\mathrm{TC}_{\mathrm{neu}}}-\sigma_{\mathrm{TC}_{\mathrm{alt}}}}{\sigma_{\mathrm{TC}_{\mathrm{alt}}}}$ so groß, daß eine Bewertung der Auswirkung des Upgrades auf den Rauschpegel hier nicht sinnvoll möglich ist. Es scheint jedoch eine Erhöhung der Rauschpegel durch den Upgrade aufgetreten zu sein. Ein Urteil läßt sich erst auf Basis der im Winter 1997/98 durchgeführten Erneuerungen der Ausleseelektronik in den anderen TCs des CBH fällen.

Die Auslesekanäle des CB1E, in denen die Vorwiderstände auf den Analogkarten entfernt wurden, sind aufgrund fehlerhafter Katalogisierung keinen Triggerzellen zuordenbar. Daher kann die Auswirkung des Upgrades auf den Rauschpegel der Triggerzellen der Bereiche des CBE, in denen die Vorwiderstände auf den Analogkarten entfernt wurden, nur anhand der 14 TCs des CB2E untersucht werden.

Abbildung 5.9 zeigt die Größe $\frac{\sigma_{\mathrm{TC}_{\mathrm{neu}}}-\sigma_{\mathrm{TC}_{\mathrm{alt}}}}{\sigma_{\mathrm{TC}_{\mathrm{alt}}}}$ in Abhängigkeit von C_D, wobei Datensätze der Datennahmeperioden 1995 und ’96 bzw. ’97 miteinander verglichen werden. In Abbildung 5.9/links ist die deutliche Reduktion der Rauschpegel der TCs in der Datennahmeperiode 1996 gegenüber den Rauschpegeln von 1995 zu erkennen. Abbildung 5.9/rechts

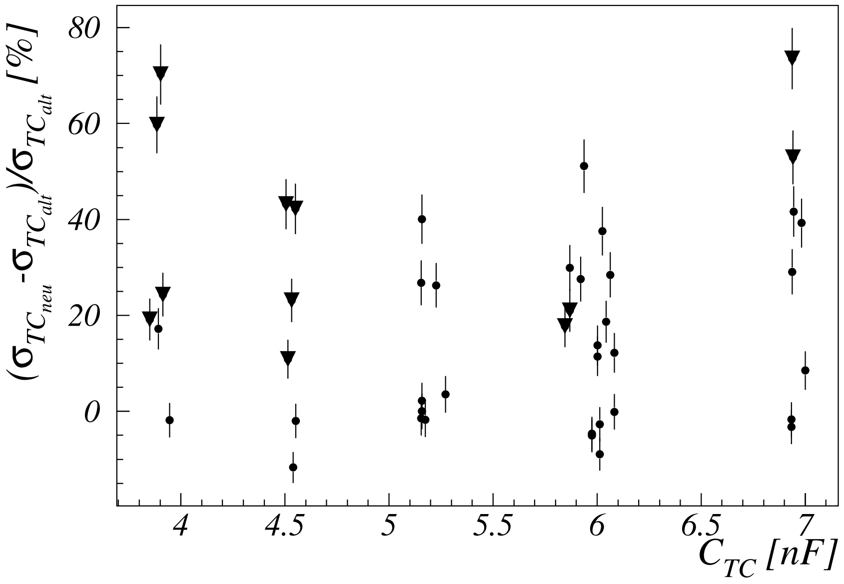


Abbildung 5.8: *Änderung* $\frac{\sigma_{\mathrm{TC_{neu}}}-\sigma_{\mathrm{TC_{alt}}}}{\sigma_{\mathrm{TC_{alt}}}}$ *der Rauschpegel von Triggerzellen in den Bereichen mit reduzierten Vorwiderständen in Abhängigkeit von der Kapazität* C_{TC} *der Triggerzellen; Triggerzellen, die aus offensichtlich defekten Analogkarten (s. Punkt 5.2.3) stammen sind durch ein ▼ besonders gekennzeichnet*

zeigt eine leichte Erhöhung der Rauschpegel von TCs in 1997 gegenüber den Rauschpegeln in 1995. Im Vergleich der beiden Abbildungen fällt der große Unterschied zwischen dem Rauschpegel der TCs in der Datennahmeperiode 1996 und den Rauschpegeln in 1997 auf. Dieser Unterschied in den Rauschpegeln ist nicht erklärbar, da zwischen beiden Datennahmeperioden nachweisbar keine Änderungen durchgeführt wurden, die Auswirkungen auf die Rauschpegel dieser Triggerzellen haben. Es ist somit nicht möglich zu entscheiden, in welchem Umfang der Upgrade, der zwischen den Datennahmeperioden 1995 und 1996 durchgeführt wurde, den Rauschpegel verändert hat.

Abschließend wird die Auswirkung des Upgrades auf die Rauschpegel der FADCs[9] betrachtet. Dieses erscheint sinnvoll, da die FADCs die für Entscheidungen im Triggerzweig des LAr-Kalorimeters relevante Stufe sind.

Abbildung 5.10 zeigt die Änderung $\frac{\sigma_{\mathrm{FADC_{neu}}}-\sigma_{\mathrm{FADC_{alt}}}}{\sigma_{\mathrm{FADC_{alt}}}}$ der Rauschpegel der FADCs zwischen den Datennahmeperioden 1995 und 1997 in Abhängigkeit der Kapazität C_{FADC} der FADCs. Dabei sind FADCs, die aus der Summe der Signale der Kanäle bestehen, die neue Vorverstärker enthalten, durch ein ★ besonders gekennzeichnet. Es ist zu erkennen, daß sich die Rauschpegel der meisten FADCs zwischen 1995 und 1997 nicht stark ändern. Vor allem bei FADCs, bei denen C_{FADC} größer als 70 nF ist, ist zudem eine leich-

---

[9] Ein Großturm ist aus ein oder zwei FADCs zusammengesetzt

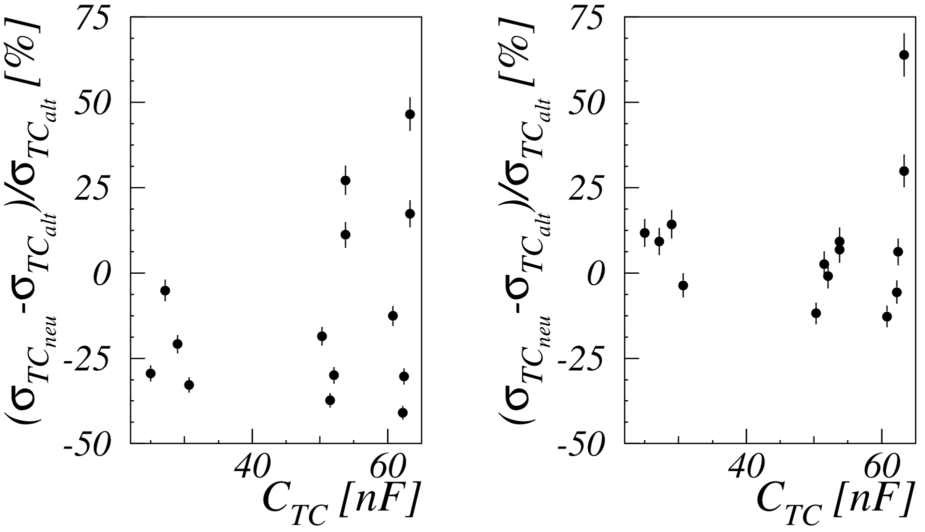


Abbildung 5.9: *Änderung* $\frac{\sigma_{\mathrm{TC_{neu}}}-\sigma_{\mathrm{TC_{alt}}}}{\sigma_{\mathrm{TC_{alt}}}}$ *der Rauschpegel von Triggerzellen im zugänglichen Bereich entfernter Vorwiderstände (CB2E); links: Vergleich von '95er und '96er Daten; rechts: Vergleich von '95er und '97er Daten*

te Erhöhung des Rauschpegels von im Mittel ca. 7,5 % zu erkennen. Die durch ein ★ gekennzeichneten FADCs zeigen jedoch eine deutliche Reduktion der Rauschpegel von im Mittel ca. 32 %. Diese Reduktion der Rauschpegel um 32 % ist die relevante Größe bei der Bewertung der Auswirkung des Upgrades auf die Rauschpegel im Triggerzweig.

5.4 Verschleiß erneuerter Analogkarten

Nachdem in den vorhergehenden Abschnitten die Auswirkungen des Upgrades auf die Rauschpegel untersucht wurden, wird in diesem Abschnitt die Statistik der defekten Auslesekanäle der Bereiche mit erneuerter Ausleseelektronik dargestellt.

Ein Auslesekanal wird dabei anhand der Größe

$$\frac{\sigma_{\mathrm{Zelle}}-\sigma_{\mathrm{Mittel}}}{\sigma_{\mathrm{Mittel}}}$$

als defekt oder nicht-defekt eingestuft. Hierbei sind:

σ_{Zelle}	$\hat{=}$ gemessener Rauschpegel des Auslesekanals
σ_{Mittel}	$\hat{=}$ Rauschpegel, der für einen Auslesekanal mit der Kapazität C_D in der Sektion des LAr-Kalorimeters, in der sich der Auslesekanal befindet, typisch ist

als defekt oder nicht defekt eingestuft.

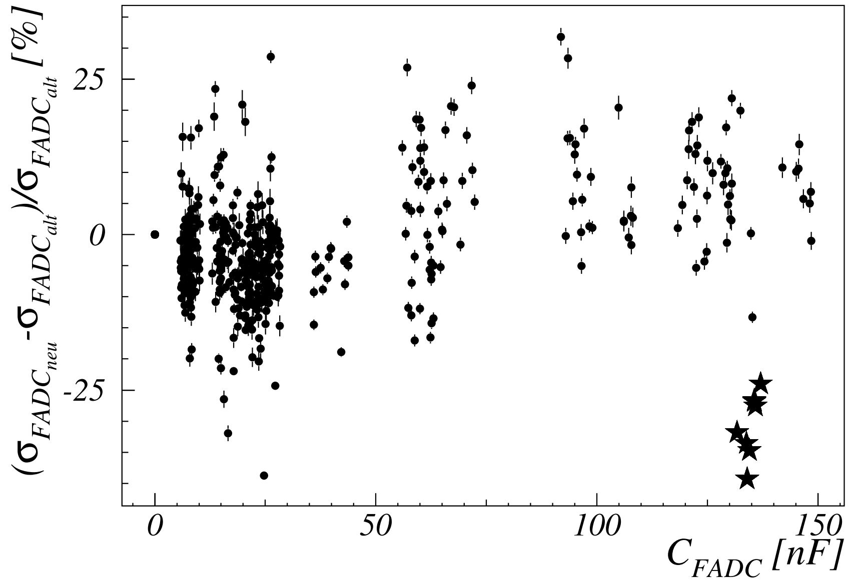


Abbildung 5.10: *Änderung* $\frac{\sigma_{\mathrm{FADC}_{\mathrm{neu}}}-\sigma_{\mathrm{FADC}_{\mathrm{alt}}}}{\sigma_{\mathrm{FADC}_{\mathrm{alt}}}}$ *der Rauschpegel der FADCs zwischen den Datennahmeperioden 1995 und '97 in Abhängigkeit der Kapazität* C_{FADC} *der FADCs; durch ein (★) sind die FADCs besonders markiert, die aus der Summe von Signalen der Kanäle bestehen, in die neue Vorverstärker eingebaut wurden*

Abbildung 5.11 zeigt die Größe $\frac{\sigma_{\mathrm{Zelle}}-\sigma_{\mathrm{Mittel}}}{\sigma_{\mathrm{Mittel}}}$ für alle Auslesekanäle des LAr-Kalorimeters in einem typischen Datensatz mit Rauschereignissen ohne Teilchenstrahlen im Beschleuniger. Überlagert ist eine an die Verteilung von $\frac{\sigma_{\mathrm{Zelle}}-\sigma_{\mathrm{Mittel}}}{\sigma_{\mathrm{Mittel}}}$ angepaßte Normalverteilung. Es ist zu erkennen, daß die Verteilung von $\frac{\sigma_{\mathrm{Zelle}}-\sigma_{\mathrm{Mittel}}}{\sigma_{\mathrm{Mittel}}}$ nicht symmetrisch, sondern zu hohen Werten von $\frac{\sigma_{\mathrm{Zelle}}-\sigma_{\mathrm{Mittel}}}{\sigma_{\mathrm{Mittel}}}$ hin aufgeweitet ist. Auslesekanäle bei denen $\frac{\sigma_{\mathrm{Zelle}}-\sigma_{\mathrm{Mittel}}}{\sigma_{\mathrm{Mittel}}}$ in einem Datensatz von Rauschereignissen größer als 20 % ist, werden als ,,auffällig" bewertet. In Abbildung 5.11 sind an der Stelle $\frac{\sigma_{\mathrm{Zelle}}-\sigma_{\mathrm{Mittel}}}{\sigma_{\mathrm{Mittel}}} = -100\,\%$ ca. 60 Einträge zu erkennen. Diese Kanäle werden aufgrund von Defekten oder sehr hohen Rauschpegeln in der Auslese des Kalorimeters nicht berücksichtigt. Auch diese Kanäle werden für den betrachteten Datensatz als ,,auffällig" eingestuft.

In der Analyse werden 17 Datensätze aus dem Zeitraum zwischen Juni 1996 und Juli 1997 untersucht. Auslesekanäle werden im folgenden als ,,defekt" bezeichnet, wenn sie ab einem untersuchten Datensatz in allen zeitlich folgenden Datensätzen als auffällig eingestuft werden. Auslesekanäle werden zusätzlich als ,,auffällig geworden" eingestuft, wenn sie ab einem Datensatz als auffällig eingestuft sind, der nicht der zeitlich erste betrachtete Datensatz ist.

Abbildung 5.12 zeigt für das CB die Statistik der defekten Kanäle verschiedener Gruppen von Auslesekanälen. Als offenes Histogramm ist der Anteil der defekten Auslesekanäle

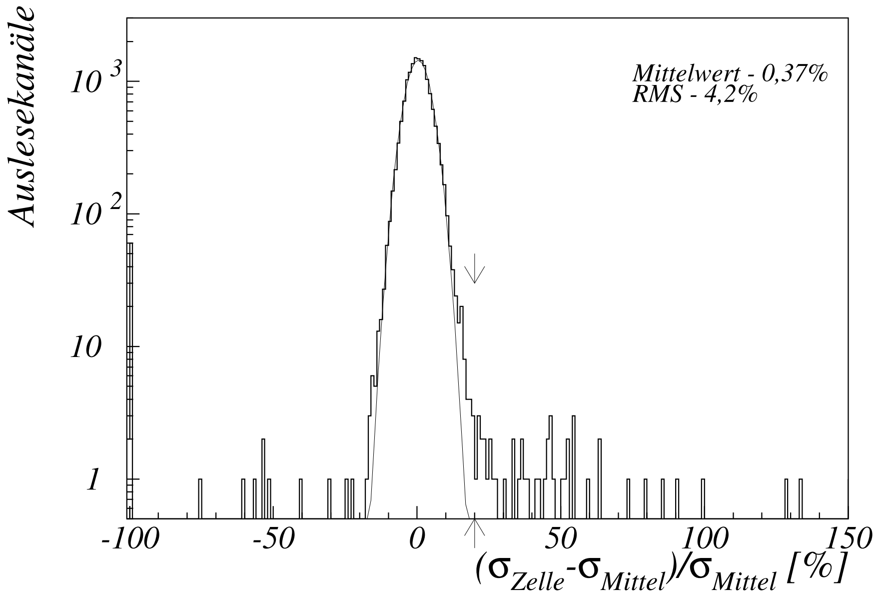


Abbildung 5.11: *Abweichung des in einer Auslesezelle gemessenen Rauschpegels σ_{Zelle} von dem Rauschpegel, der aufgrund der Kapazität der Zelle σ_{Mittel} zu erwarten ist; die Abweichung oberhalb der eine Auslesezelle als „auffällig“ deklariert wird, ist durch die Pfeile markiert*

einer Gruppe von Auslesekanälen aufgetragen. Das schattiert überlagerte Histogramm entspricht dem Anteil auffällig gewordener Auslesekanäle.

Von den 16842 Auslesekanälen des CB *CB(gesamt)* sind derzeit 147 als defekt deklariert, was einem Anteil von ca. 0,9 % entspricht. Ein großer Anteil (ca. 1/3) davon sind Auslesekanäle des BBE *BBE(P/A)*. Im BBE sind derzeit 4,7 % der Auslesekanäle als defekt deklariert. Im Vergleich dazu sind im Bereich des CB1E, in denen neue Vorverstärker eingebaut wurden *CB1E(P/A)*, nur 4 der 512 Auslesekanäle (0,78 %) „defekt“. Zwei dieser Auslesekanäle waren dabei bereits vor der Erneuerung der Ausleseelektronik im Rahmen des Upgrades als defekt deklariert. Die beiden anderen defekten Auslesekanäle sind seit der ersten Messung nach dem Einbau neuer Vorverstärker als defekt deklariert. Der unterschiedlich große Anteil defekter Kanäle im $BBE(P/A)$ und $CB1E(P/A)$ zeigt den Erfolg der ausgedehnten Tests der Analogkarten der Gruppe $CB1E(P/A)$ nach dem Umrüsten. Fehlerhaft bearbeitete Analogkarten wurden direkt ausgebessert. Ebenso waren durch die erhöhte Beanspruchung vor dem Einbau im H1-Detektor wenig stabile Bauteile bekannt und wurden ausgetauscht. Der geringe Anteil wenig stabiler Bauteile nach dem Einbau im H1-Detektor zeigt sich darin, daß in der Gruppe $CB1E(P/A)$ seit dem Wiedereinbau in den H1-Detektor keine weiteren Auslesekanäle als defekt deklariert wurden. Im Gegensatz dazu sind in der Gruppe $BBE(P/A)$ seit dem Einbau neuer Vorverstärker 7 (0,73 %) defekte Kanäle hinzugekommen.

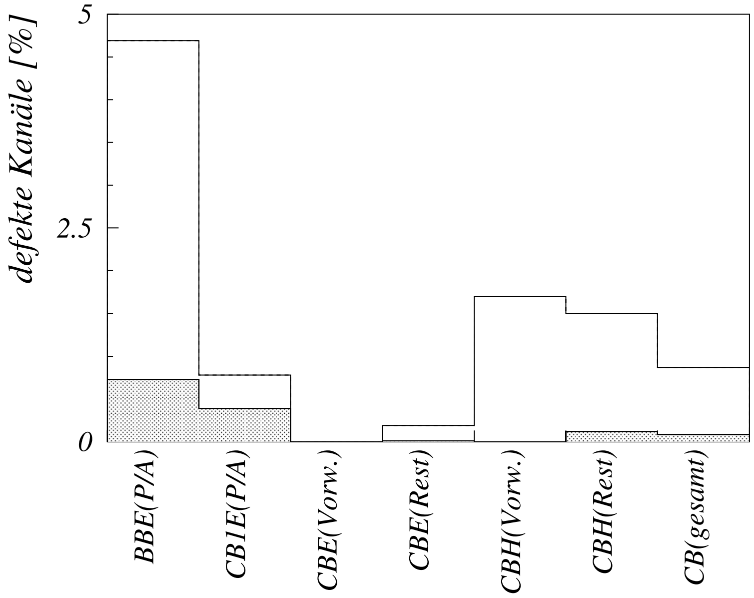


Abbildung 5.12: *Anteil defekter Auslesekanäle in verschiedenen Gruppen von Auslesekanälen des CB; der Anteil, der als ,,defekt" deklarierten Auslesekanäle ist als offenes Histogramm aufgetragen; der Anteil der ,,auffällig gewordenen" Kanäle ist als schattiertes Histogramm überlagert; die einzelnen Bereiche sowie die Definitionen ,,defekt" und ,,auffällig geworden" sind im Text erklärt*

In den Auslesekanälen des CBE $CBE(Vorw.)$, in denen auf den Analogkarten die Vorwiderstände verringert wurden, sind bislang keine Kanäle als defekt deklariert worden. Hieran ist zu erkennen, daß das Auslöten der Vorwiderstände, ohne Schäden an der Elektronik zu hinterlassen, möglich ist.

In der Gruppe der Auslesekanäle des CBH $CBH(Vorw.)$, in denen die Vorwiderstände verringert wurden, sind ca. 1,7 % der Auslesekanäle als defekt deklariert. In Abbildung 5.4/-unten ist zu erkennen, daß der Anteil der Kanäle mit anormal hohen Rauschpegeln höher ist, als der Anteil der in Abbildung 5.4 als defekt deklarierten Kanäle. Der Unterschied liegt in der Methode begründet, nach der Auslesekanäle als defekt deklariert werden. In der Gruppe $CBH(Vorw.)$ haben so viele Auslesekanäle einen anormal hohen Rauschpegel, daß der Wert für σ_{Mittel} merklich durch diese Kanäle angehoben wird. Dadurch liegt σ_{Zelle} einiger Kanäle mit anormal hohem Rauschpegel unter dem Wert von $1,2 \cdot \sigma_{Mittel}$. Diese Auslesekanäle werden fälschlich nicht als defekt deklariert.

Die Auftragung des Anteils defekter Kanäle der Bereiche hadronischer *CBH(Rest)* bzw. elektromagnetischer *CBE(Rest)* Sektionen des CBs, in denen keine Änderungen an der Ausleseelektronik vorgenommen wurden, dient dem Vergleich zu den anderen Bereichen.

Kapitel 6

Auswirkung der Ergebnisse auf Messungen bei H1

Aus den in vorhergehenden Kapiteln angesprochenen Effekten ergeben sich Fragestellungen, von denen einige hier untersucht werden:

- Wie wirkt sich die Differenz der Pedestals, die in der Kalibration bzw. unter Run-Bedingungen bestimmt werden, auf Analysen bei H1 aus?
- Wie stark verbessert sich die Energieauflösung in Folge des Einbaus neuer Vorverstärker?
- Wie wirkt sich die geringere notwendige Nullpunktsunterdrückung nach dem Einbau neuer Vorverstärker auf den Anteil des in der Signalauslese verworfenen Signals aus?
- Wie stark ändert sich die Effizienz von Triggern für Ereignisse mit kleinen Energiedepositionen im LAr-Kalorimeter durch die neuen Vorverstärker?

Die gestellten Fragen werden für Ereignisklassen beantwortet, bei denen gewöhnlich kleine Energien im LAr-Kalorimeter deponiert werden. Diese Ereignisklassen werden ausgewählt, da mit wachsenden Energiedepositionen sowohl das Rauschen als auch fehlerhaft festgelegte Pedestalwerte eine zunehmend geringere Auswirkung auf die Datennahme und Analysen bei H1 haben. Zur Untersuchung bieten sich z.B. Ereignisklassen mit isolierten Teilchenspuren, niederenergetischen Jets oder J/Ψ-Zerfällen an. Eine weitere Möglichkeit bietet die Untersuchung der Energiedepositionen von kosmischen oder Halo-Myonen.

Die Auswirkungen neuer Vorverstärker können im BBE sowie in dem Bereich des CB1E, in dem neue Vorverstärker eingebaut wurden, untersucht werden. Der Bereich des CB1E, in dessen Ausleseelektronik neue Vorverstärker eingebaut wurden, ist jedoch so klein, daß nur in seltenen Fällen Teilchen aus Wechselwirkungen von Elektronen und Protonen an dieser Stelle ins LAr-Kalorimeter treten. Zudem ist der Bereich mit erneuerter Ausleseelektronik so klein, daß Energiedepositionen von Teilchen häufig über diesen Bereich hinausragen. Dieses würde bei einer Untersuchung des CB1E den systematischen Fehler deutlich erhöhen. In dem Bereich des CB1E ist folglich eine Untersuchung der Auswirkungen des Upgrades nicht sinnvoll durchzuführen.

Für eine Untersuchung der Auswirkung des Upgrades auf die Datennahme und Analysen bei H1 mit Hilfe des BBEs sind nicht alle der genannten Ereignisklassen geeignet. Teilchen, die vom Wechselwirkungspunkt des H1-Detektors kommen, müssen vor dem Eintritt in das BBE einige Lagen von Kabelsträngen durchqueren. Teilweise müssen die Teilchen zudem das SpaCal passieren (s. Abb. 2.2). Beides führt zu erheblichen Energieverlusten und zu einer erhöhten systematischen Unsicherheit auf untersuchte Observable. Um diese Probleme zu umgehen, bietet sich eine Untersuchung der Energiedepositionen von kosmischen oder von Halo-Myonen[1] im LAr-Kalorimeter an. Myonen stellen im Energieintervall von ca. 1 GeV bis 200 GeV eine Eichquelle mit nahezu konstanter mittlerer Energiedeposition pro Wegstrecke durchquerten Materials dar (s. Abb. 6.1 und 6.2). Aufgrund der Orientierung der Ausleseplatten (s. Abb. 2.3) eignen sich für Untersuchungen des BBEs nur Halo-Myonen. Die bei HERA auftretenden Halo-Myonen haben Energien innerhalb des genannten Intervalls von 1 GeV und 200 GeV [39].

In Abschnitt 6.5 wird eine Untersuchung des FB1H vorgestellt. Da auch im FB1H die Orientierung der Ausleseplatten senkrecht zur Strahlachse ist (s. Abb. 2.3), ist die Untersuchung durch Halo-Myonen möglich.

6.1 Energiedeposition geladener Teilchen

Durchqueren geladene Teilchen Materie, so kommt es zu unterschiedlichen Arten von Wechselwirkungen. Es würde den Umfang der Arbeit sprengen, auf alle möglichen Wechselwirkungen einzugehen. Im folgenden wird daher nur auf ausgewählte Wechselwirkungen eingegangen, die für Myonen relevant sind. In Abbildung 6.1 sind die Hauptbeiträge zum Energieverlust der Myonen und ihre Energieabhängigkeit aufgetragen. Es ist zu erkennen, daß im Energiebereich der Halo-Myonen bei HERA Ionisationsprozesse, Bremsstrahlung und Paarbildung zum Energieverlust beitragen (s. auch [39]). Dabei dominiert im gesamten Energiebereich der Energieverlust der Myonen durch Ionisation.

6.1.1 Ionisation

Durch die Wechselwirkung von geladenen Teilchen mit den Hüllenelektronen des durchquerten Mediums wird dieses ionisiert. Die Energie der durch die Ionisation freigesetzten Elektronen ist dabei meist so gering, daß die Elektronen nicht selber auch ionisierend wirken. In seltenen Fällen erhalten die Elektronen jedoch soviel Energie übertragen, daß sie ihrerseits ionisierend wirken. In diesem Fall treten lokal stark erhöhte Energiedepositionen auf.

---

[1] Halo-Myonen erhalten ihren Namen, weil sie den eigentlichen Strahl umgeben. Sie entstehen durch Stöße der Protonen mit Restgasatomen oder der Strahlrohrwand und fliegen von da ab nahezu parallel zum Strahlrohr.

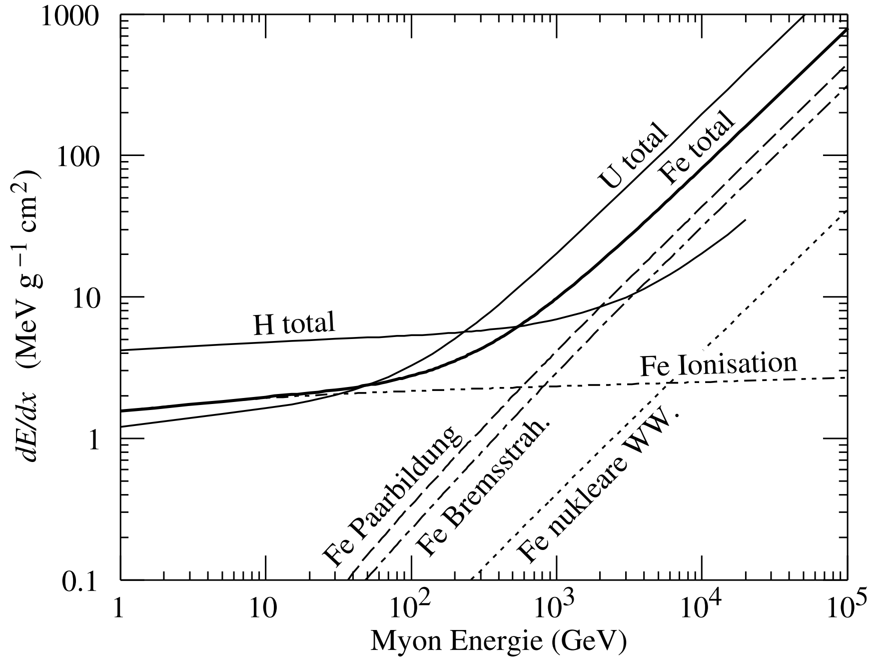


Abbildung 6.1: *Mittlerer Energieverlust von Myonen pro Wegstrecke zurückgelegt in Wasserstoff (H), Uran (U) und Eisen (Fe); für Eisen sind die beitragenden Energieverlustprozesse in Abhängigkeit der Myonenergie dargestellt [65]*

Eine theoretische Beschreibung der mittleren durch Ionisation deponierten Energie eines schweren geladenen Teilchens erfolgt durch die Bethe-Bloch-Formel [59]:

$$\left.\frac{dE}{dx}\right|_{Ion} = \frac{2\pi e^4 n}{m_e c^2 \beta}\left[\ln\left(\frac{m_e c^2 \beta^2 T}{2I^2(1-\beta^2)}\right) - \left(2\sqrt{1-\beta^2} - 1 + \beta^2\right)\ln 2 + \frac{1-\sqrt{1-\beta^2}}{8} - \delta\right] \tag{6.1}$$

mit:

x $\hat{=}$ durchquerte Wegstrecke im Medium
e $= 1,602 \cdot 10^{-19}\, C$ (Elementarladung)
c $= 2,99 \cdot 10^8\, \frac{m}{s}$ (Lichtgeschwindigkeit
m_e $\hat{=}$ Ruhemasse des Elektrons
n $\hat{=}$ Dichte der Elektronen im durchquerten Medium
β $\hat{=}$ relativistischer Faktor $(\frac{v}{c})$
I $\hat{=}$ gemitteltes Ionisationspotential der Hüllenelektronen des durchquerten Mediums
T $\hat{=}$ kinetische Energie des passierenden Teilchens
δ $\hat{=}$ Dichtekorrektur, welche die Polarisation des durchquerten Mediums durch das passierende Teilchen berücksichtigt [60]

In [62] findet sich eine genauere Beschreibung von $\left.\frac{dE}{dx}\right|_{Ion}$, die noch weitere Korrekturen, z.B. für Schaleneffekte oder quantenelektrodynamische Effekte enthält.

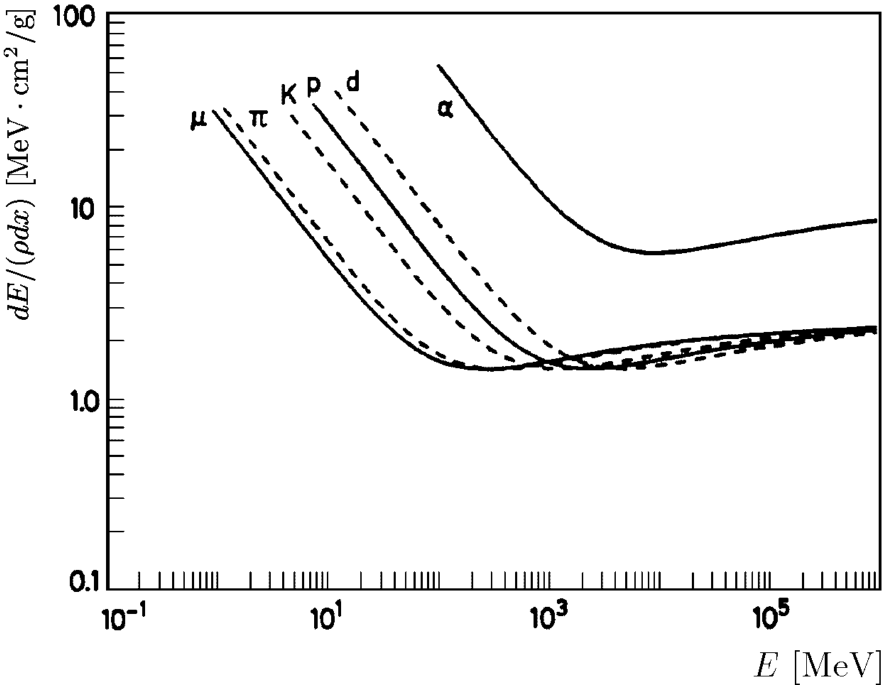


Abbildung 6.2: *Energieverlust schwerer, geladener Teilchen durch Ionisation in Abhängigkeit von der Teilchenenergie [62]*

Formel 6.1 ist zu entnehmen, daß bei niedrigen Energien ein $\frac{1}{v^2}$-Verhalten von $\frac{dE}{dx}\big|_{Ion}$ auftritt. Das Minimum von $\frac{dE}{dx}\big|_{Ion}$ liegt bei ca. dem Vierfachen der Ruheenergie des ionisierenden Teilchens. Teilchen bei deren Energie $\frac{dE}{dx}\big|_{Ion}$ minimal wird, werden als „minimalionisierend“ bezeichnet. Bei höheren Teilchenenergien wird das transversale elektrische Feld relativistisch verstärkt, so daß $\frac{dE}{dx}\big|_{Ion}$ wieder ansteigt.

Die Ladung des ionisierenden Teilchens führt zu einer Polarisation im durchquerten Medium. Hierdurch wird das Anwachsen des transversalen elektrischen Feldes der ionisierenden Teilchen wieder abgeschwächt. Der Effekt wird durch eine Abhängigkeit der Dichtekorrektur δ gemäß $\delta(\beta)$ beschrieben [60, 61]. Bei großen Teilchengeschwindigkeiten muß dieser Effekt berücksichtigt werden. Er führt dazu, daß sich bei hohen Teilchenenergien ein konstanter Wert von $\frac{dE}{dx}\big|_{Ion}$ einstellt. Dieser wird als Fermi-Plateau bezeichnet.

In Abbildung 6.2 ist zu erkennen, daß der Bereich des Fermi-Plateaus für Myonen bei besonders niedrigen Energien einsetzt. Bei den Energien der Halo-Myonen, die in dieser Arbeit untersucht werden, ist $\frac{dE}{dx}\big|_{Ion}$ daher nahezu konstant.

6.1.2 Bremsstrahlung

Ein weiterer Energieverlustprozeß geladener Teilchen ist die Bremsstrahlung [64]. Werden geladene Teilchen im Coulombfeld der Kerne des Detektormaterials beschleunigt, so geben sie Energie in Form von Photonen ab. Eine theoretische Beschreibung von $\frac{dE}{dx}\big|_{\text{Brems}}$ erfolgt durch [64]:

$$-\left.\frac{dE}{dx}\right|_{\text{Brems}} = 4\alpha N_A \varrho \frac{Z^2}{A} z^2 r_e^2 \left(\frac{m_e}{m}\right)^2 \cdot E \cdot ln\left(\frac{183}{Z^{\frac{1}{3}}}\right) = \frac{E}{X_0} \cdot \left(\frac{m_e}{m}\right)^2 \tag{6.2}$$

mit:
α $\hat{=}$ Feinstrukturkonstante
E $\hat{=}$ Energie des einfallenden Teilchens
m $\hat{=}$ Masse des Teilchens
z $\hat{=}$ Ladung des einfallenden Teilchens in Einheiten der Elementarladung
Z, A $\hat{=}$ Kernladungs- und Massenzahl des durchquerten Mediums
ϱ $\hat{=}$ Massendichte des durchquerten Mediums
N_A $= 6,022 \cdot 10^{23}\, mol^{-1}$ (Avogadrokonstante)
r_e $\hat{=}$ klassischer Elektronenradius
für den Rest der Variablen schaue man in die Erklärung zu Formel 6.1

X_0 wird als „Strahlungslänge“ bezeichnet. Die Strahlungslänge gibt die Strecke in einem Medium an, in der die Energie eines durchquerenden Elektrons im Mittel auf den Anteil $\frac{1}{e}$ abnimmt. Es ist zu erkennen, daß der Wirkungsquerschnitt für Bremsstrahlung proportional zu $\left(\frac{m_e}{m}\right)^2$ ist. Wärend die Bremsstrahlung somit für relativistische Elektronen den Energieverlustprozeß dominiert, trägt sie für Myonen nur untergeordnet zum Energieverlust bei [39]. In einzelnen Ereignissen kann es durch Fluktuationen jedoch zur Abstrahlung von Photonen kommen.

Die Wechselwirkung dieser Photonen mit Materie wird in Abschnitt 6.1.5 beschrieben.

6.1.3 Paarbildung

In Kernnähe können relativistische Teilchen über den Austausch virtueller Photonen inelastisch Elektron-Positron-Paare erzeugen. Die mittlere freie Weglänge bezüglich Paarbildung liegt dabei in der Größenordnung der Strahlungslänge ($l \approx 9/7 X_0$). Die Paarbildung trägt daher ebenso wie die Bremsstrahlung bei den betrachteten Myon-Energien kaum zum Energieverlust von Myonen bei (s. Abb. 6.1).

6.1.4 Vielfachstreuung

Neben der inelastischen Streuung relativistischer Teilchen im Coulombfeld von Kernen besteht die Möglichkeit einer elastischen Wechselwirkung. Das relativistische Teilchen wird dabei etwas aus seiner ursprünglichen Flugrichtung gelenkt. Die Streutheorie von Molière beschreibt die mittlere Ablenkung relativistischer Teilchen, die diese nach dem Zurücklegen der Strecke x in einem Medium erfahren. Die Winkelverteilung kann durch eine Normalverteilung approximiert werden. Die Standardabweichung der auf eine Ebene projizierten Streuwinkelverteilung θ_{proj}, bei der die Projektionsebene die Einfallsgerade enthält, wird durch folgende Gleichung beschrieben [65]:

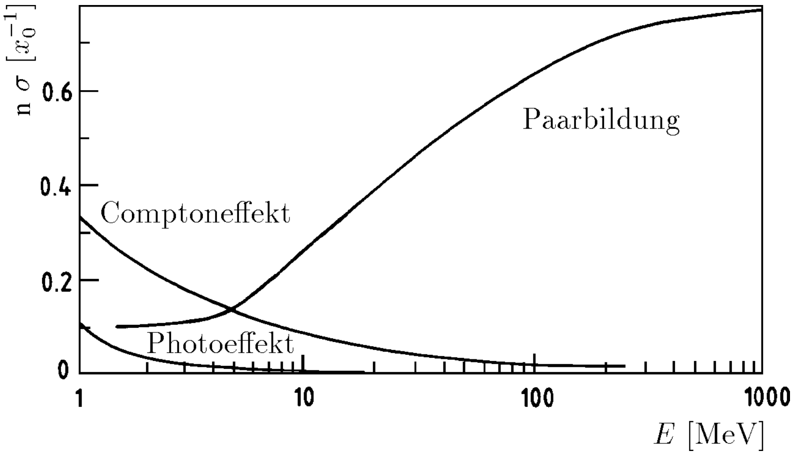


Abbildung 6.3: *Absorptionskoeffizient $n\sigma$ verschiedener Absorbtionsprozesse von Photonen in Blei in Abhängigkeit von der Photonenergie E, gemessen in reziproken Strahlungslängen x_o^{-1} [63]*

$$\theta_{proj} = \frac{13,4\,\mathrm{MeV}}{\beta c p}\sqrt{\frac{x}{X_0}} \cdot z \cdot \left[1 + 0,038 \ln\left(\frac{x}{X_0}\right)\right] \tag{6.3}$$

mit:

p = Teilchenimpuls
β $\hat{=}$ relativistischer Faktor $(\frac{v}{c})$
c $\hat{=}$ Lichtgeschwindigkeit
z $\hat{=}$ Ladung des Teilchens in Einheiten der Elementarladung
x $\hat{=}$ durchquerte Wegstrecke
X_0 $\hat{=}$ Strahlungslänge

6.1.5 Wechselwirkung von Photonen mit Materie

Die Wechselwirkung von Photonen mit Materie [22] läßt sich als statistischen Prozeß beschreiben. Für diesen gilt:

$$I(x) = I_0 \cdot e^{-n\sigma x}$$

mit:

$I(x)$ $\hat{=}$ Intensität eines Photonstrahls
I_0 $\hat{=}$ Anfängliche Intensität des Photonstrahls
n $\hat{=}$ Teilchendichte im durchquerten Medium
σ $= \sum_i \sigma_i$ $\hat{=}$ Wirkungsquerschnitt für verschiedene Wechselwirkungen
x $\hat{=}$ im Medium zurückgelegte Strecke

Im wesentlichen tragen drei Wechselwirkungen zu σ bei (s. Abb. 6.3):

Paarbildung: Photonen können im Coulombfeld der Kerne des durchquerten Mediums in e^+e^--Paare konvertieren. Es ist in Abbildung 6.3 zu erkennen, daß dieser Prozeß bei Photonenergien oberhalb von 100 MeV die Wechselwirkung von Photonen mit Materie dominiert. Bei kleineren Photonenergien verliert die Paarbildung an Bedeutung und ist unterhalb des Schwellenwertes $E_\gamma = 2m_ec^2$ nicht mehr möglich.

Compton-Streuung: Als Compton-Streuung wird die elastische Streuung von Photonen an den Hüllenelektronen der Atome des durchquerten Mediums bezeichnet. Hierbei wird die Bindungsenergie der Elektronen vernachlässigt. Compton-Streuung dominiert die Wechselwirkung von Photonen bei Photonenergien zwischen ca. 0,1 MeV und ca. 2 MeV.

Photoeffekt: Niederenergetische Photonen können die Atome des durchquerten Materials ionisieren. Dieser Prozeß dominiert die Wechselwirkung bei Photonenergien von $E_\gamma < 0,01$ MeV.

6.2 Datennahme und Trigger

Die in dieser Arbeit untersuchten Halo-Myon-Ereignisse wurden aufgezeichnet, als sich nur Protonen im Speicherring befanden [39]. Bei der Auslese der Daten wurde auf eine Nullpunktsunterdrückung verzichtet, um die vollständige Kalorimeterinformation für die Analyse vorliegen zu haben.

Der Detektor wurde unter der Bedingung ausgelesen, daß in einem Ereignis mindestens eine der Veto-Wände (s. Abschn. 2.2.3) einen Teilchendurchgang registriert. Zusätzlich wurde jeweils mindestens ein Eintrag im hinteren sowie im vorderen instrumentierten Eisen (s. Abschn. 2.2.2) verlangt.

Durch die Kombination der drei Bedingungen werden mit hoher Sicherheit Ereignisse ausgelesen, in denen mindestens ein Halo-Myon den Detektor durchquert.

6.3 Simulierte Daten

Bei der Analyse werden zum Teil Datensätze mit simulierten Halo-Myon-Ereignissen verwendet [39]. Die Simulation der Halo-Myon-Ereignisse verläuft dabei in zwei Schritten. Zunächst werden die Startpunkte (Startvertices) und die Impulse der Myonen festgelegt. Danach wird die Bewegung der Myonen im Detektor und mögliche Wechselwirkungen mit den Materialien der Detektorkomponenten simuliert und die Signale der Detektorkomponenten wie bei realen Signalen verarbeitet.

6.3.1 Generierung der Ereignisse

Zunächst werden die Startvertices von denen aus die Spur der Halo-Myonen[2] simuliert wird, zufällig im Bereich zwischen z = -10 m und z = -6 m festgelegt. Zusätzlich werden die

---

[2] In der Simulation wird nicht zwischen μ^+ und μ^- unterschieden

Startvertices im Intervall $R_s \in [0,006\,m; 2,5\,m]$ des Abstandes von der Strahlachse und im Azimutalwinkel ϕ_s um die Strahlachse gleichverteilt.

Weiterhin wird die anfängliche Richtung des Myon-Impulses durch die direkte Verbindung des Startpunktes mit einem Punkt im vorderen instrumentierten Eisen festgelegt. Dabei gilt:

- für den Unterschied der Radien:

$$0,8 \cdot R_s \leq R_v \leq 1,4 \cdot R_s \tag{6.4}$$

  mit:
  R_s $\hat{=}$ Entfernung des Startvertex des Myons von der Strahlachse
  R_v $\hat{=}$ Entfernung des Durchstoßpunktes im vorderen instrumentierten Eisen von der Strahlachse

- für den Unterschied der Punkte in ϕ:

$$\Delta\phi = ||\phi_v - \phi s|| \leq 10^\circ \tag{6.5}$$

  mit:
  $\Delta\phi$ $\hat{=}$ Abweichung der ϕ-Koordinate des Startpunktes vom Punkt im vorderen instrumentierten Eisen
  ϕ_s $\hat{=}$ ϕ-Koordinate des Startpunktes
  ϕ_s $\hat{=}$ ϕ-Koordinate des Punktes im vorderen instrumentierten Eisen

  Durch den erlaubten Bereich in ϕ wird berücksichtigt, daß die Halo-Myonen nicht direkt an der Strahlachse erzeugt werden.

Als Impulsspektrum der simulierten Myonen wurde die von Allkofer [66] angegebene Parametrisierung des Impulsspektrums kosmischer Myonen gewählt. Dieses ist möglich, da die Form des Impulsspektrums kosmischer Myonen mit dem der Halo-Myonen übereinstimmt, daß bei den Halo-Myonen bei H1 gemessen wird [39]. Es wurden aus dem Spektrum nur Myonimpulse verwendet, die größer als $6\,\frac{GeV}{c}$ waren.

6.3.2 Simulation der Ereignisse

Die Simulation der Ereignisse erfolgt durch das Programmpaket H1SIM [68]. H1SIM wird dazu verwendet, die Wechselwirkung von Teilchen mit den einzelnen Detektorkomponenten bei H1 zu simulieren. Danach werden in H1SIM die Signale, die durch die Wechselwirkung in den einzelnen Detektorkomponenten entstehen, wie reale Detektorsignale verarbeitet.

Die Wechselwirkungen von Teilchen mit den einzelnen Detektorkomponenten werden durch das Programmpaket GEANT [67] simuliert. GEANT bietet die Möglichkeit, die einzelnen Detektorkomponenten aus verschiedenen einfachen geometrischen Formen zusammenzusetzen. Jeder dieser Formen wird dabei ein Material zugewiesen.

In der Simulation werden die Teilchen in kurzen Wegstrecken durch die Materialien geleitet. Dabei werden verschiedene mögliche Energieverlustprozesse berücksichtigt. GEANT bietet die Möglichkeit, entweder alle möglichen Energieverlustprozesse zu berücksichtigen oder gezielt einige auszuschließen. Bei den verwendeten simulierten Datensätzen wurden alle möglichen Energieverlustprozesse simuliert. Entstehen bei einem dieser Prozesse Sekundärteilchen, so wird auch deren Spur durch die Detektorkomponenten weiter verfolgt. Sinkt die Energie eines Teilchens unter einen frei wählbaren Schwellenwert, so wird die Spur nicht weiter verfolgt. Es wird vielmehr angenommen, daß die Restenergie des Teilchens an der aktuellen Position im Detektor deponiert wird.

Das LAr-Kalorimeter setzt sich aus vielen abwechselnden Schichten unterschiedlicher Materialien zusammen (s. Abb. 2.5). Um die Zeit für die Simulation eines Ereignisses zu reduzieren, ist es möglich, die unterschiedlichen Materialien zusammenzufassen und durch ein „Durchschnittsmaterial“ zu ersetzen, aus dem dann ganze Kalorimeter-Module bestehen.

Bei den in dieser Arbeit verwendeten simulierten Halo-Myon-Ereignissen wurde diese mögliche Mittelung der unterschiedlichen Materialien nicht durchgeführt. Es wurde die Simulation mit einer „feinen Granularität“ vorgenommen. Weiterhin wurden niedrige Schwellenwerte verwendet, bei denen Teilchen noch weiter verfolgt werden. In [69] wird gezeigt, daß diese beiden Bedingungen für eine Beschreibung des Verhaltens von Myonen notwendig sind.

Nachdem die Spur des Myons durch den gesamten Detektor verfolgt wurde, erfolgt eine Verarbeitung der Signale der Detektorkomponenten wie bei gemessenen Ereignissen. Das elektronische Rauschen der Ausleseelektronik des LAr-Kalorimeters wird in dieser Stufe der Simulation jedoch nicht berücksichtigt. Daher werden nur die Einträge der Auslesekanäle des LAr-Kalorimeters gespeichert, die wirklich Signale des Myons enthalten, das in der Simulation den Detektor durchquert hat.

Bei der Rekonstruktion der simulierten Daten besteht die Möglichkeit, das Rauschen der Ausleseelektronik des LAr-Kalorimeters dadurch zu simulieren, daß den Signaleinträgen der Auslesekanäle des simulierten Ereignisses ein Rauschereignis überlagert wird.

6.4 Datenselektion

Zur Selektion von Ereignissen, in denen im Detektor nur die Signale eines Myons auftreten und das Myon zusätzlich eine Mindestenergie hat, werden bei der Analyse der Daten einige Schnitte angebracht. Diese Schnitte sind dabei für simulierte und gemessene Myon-Ereignisse die gleichen:

- Es wird die Anzahl der Spuren im instrumentierten Eisen untersucht [16]. Wird nicht genau eine Spur im hinteren instrumentierten Eisen und genau eine Spur im vorderen instrumentierten Eisen gefunden, so wird das Ereignis verworfen.

Durch diese Forderung wird die Analyse von Ereignissen verhindert, die aus einer Überlagerung der Signale mehrerer Ereignisse bestehen. Als Ereignisse, die dem Signal des Myons überlagert sind, sind Strahl-Gas- oder Strahl-Wand-Ereignisse in der Nähe des Detektors, oder Spuren von weiteren kosmischen oder Halo-Myonen denkbar.

Es ist notwendig solche Ereignisse zu verwerfen, da bei einer Überlagerung der Energiedepositionen fehlerhaft hohe deponierte Energien für das untersuchte Myon gemessen werden.

- Es wird zudem die Größe

$$\Delta\phi = \phi_{vorne} - \phi_{hinten}$$

mit:

ϕ_{vorne} $\hat{=}$ Winkel ϕ des Durchstoßpunktes im vorderen instrumentierten Eisen
ϕ_{hinten} $\hat{=}$ Winkel ϕ des Durchstoßpunktes im hinteren instrumentierten Eisen

untersucht. Ist $\Delta\phi > 15°$, so wird das Ereignis verworfen.

Die Unsicherheit von ϕ aufgrund der Vielfachstreuung ist kleiner als 3 %. Weiterhin ist die Unsicherheit von $\phi < 1\,\%$, die daraus resultiert, daß die Halo-Myonen nicht direkt an der Strahlachse gebildet werden.

Durch die Forderung an $\Delta\phi$ werden niederenergetische Myonen verworfen. Durch die kleine Geschwindigkeit der Myonen ist mit einem großen Einfluß des magnetischen Feldes im Detektor und dadurch mit großen Werten von $\Delta\phi$ zu rechnen.

Es ist notwendig, die Analyse von niederenergetischen Myonen auszuschließen, da bei niederenergetischen Myonen eine deutlich andere Energiedeposition pro Wegstrecke auftritt (s. Abb. 6.2).

- Es wird die Größe

$$\Delta R = R_{vorne} - R_{hinten}$$

mit:

R_{vorne} $\hat{=}$ Abstand des Durchstoßpunktes
im vorderen instrumentierten Eisen von der Strahlachse
R_{hinten} $\hat{=}$ Abstand des Durchstoßpunktes
im hinteren instrumentierten Eisen von der Strahlachse

untersucht.
Liegt ΔR außerhalb des Intervalls $\Delta R \in [-10\,cm; 50\,cm]$, so wird das Ereignis verworfen. Die Unsicherheit von ΔR aufgrund der Vielfachstreuung innerhalb des Detektors ist auf $\Delta R < 22\,cm$ abzuschätzen. Das Intervall in dem ΔR erlaubt ist, ist nicht symmetrisch um 0. Die Asymmetrie wurde gewählt, da die Halo-Myonen in Nähe der Strahlachse erzeugt werden und isch von dort entfernen. Kleine, positive Werte von ΔR sind daher im allgemeinen nicht zu vermeiden.

Durch die Forderung an ΔR wird sichergestellt, daß nur Ereignisse analysiert werden, in denen die Myonen unter kleinen Winkeln zum Lot die Ausleseplatten durchqueren.

Es ist notwendig den erlaubten Bereich von ΔR einzuschränken, da die Anzahl der Ionenpaare, die in den Argon-Bereichen gebildet wird, von dem Winkel abhängig ist, in dem die Myonen die Argon-Bereiche der Auslesezellen durchqueren. Der maximal erlaubte Unterschied der Länge der Myon-Spur in den Argon-Bereichen beträgt durch den Schnitt 1,5 %.

6.4.1 Bestimmung von dE/dz

In Abschnitt 6.1.1 wird erwähnt, daß Halo-Myonen des bei H1 relevanten Energieintervalls eine Eichquelle mit annähernd konstanter Energiedeposition pro Wegstrecke $\frac{dE}{dz}$ bilden. Die in den Auslesezellen influenzierte Ladung Q_{inf} ist gemäß Formel 3.11 proportional zur deponierten Energie E_{dep} der Myonen. Im folgenden wird daher nur die in den Auslesezellen influenzierte Ladung pro Wegstrecke $\frac{dQ}{dz}$ betrachtet.

In Abschnitt 6.1 wird angesprochen, daß Myonen im relevanten Energiebereich hauptsächlich durch Ionisation Energie deponieren. Da bei Energiedepositionen durch Ionisation im allgemeinen keine Teilchenschauer gebildet werden, sind von den Myonen Energiedepositionen in wenigen Auslesezellen in einer Schicht der Auslesezellen zu erwarten.

Im folgenden wird die Größe N_{Lage} untersucht. N_{Lage} bezeichnet dabei die Anzahl der Auslesezellen in denen ein Myon Energie deponiert, wenn es eine Schicht der Auslesezellen in einem Kalorimeter-Modul passiert. N_{Lage} ist dabei von der Größe der Auslesezellen abhängig und somit für unterschiedliche Sektionen getrennt zu untersuchen. Die Untersuchung wird anhand von simulierten Halo-Myon-Ereignissen durchgeführt. Die simulierten Daten (s. Abschn. 6.3) werden dabei rekonstruiert, ohne das Rauschen der Auslesekanäle des LAr-Kalorimeters zu überlagern.

In Abbildung 6.4 ist die Größe N_{Lage} aufgetragen, die für die Module des BBEs gültig ist. Es ist zu erkennen, daß in den meisten Schichten des BBEs nur in einer Auslesezelle vom Myon Energie deponiert wird. Dieses ist die Auslesezelle, die das Myon in der Schicht durchquert. Wenn das Myon an der Grenze zwischen mehreren Auslesezellen eine Schicht der Auslesezellen durchquert, tritt ein Signal in mehr als einer Auslesezelle auf. Dieser Fall entspricht in Abbildung 6.4 den Ereignissen, in denen zwei bis vier Auslesezellen ein Signal enthalten. In wenigen Ereignissen treten in mehr als vier Auslesezellen in einer Schicht der Auslesezellen Energiedepositionen eines Halo-Myons auf. In diesen Fällen wurde vom Myon ein elektromagnetischer Schauer angeregt.

Um die von den Halo-Myonen in einer Sektion des LAr-Kalorimeters deponierte Energie zu bestimmen, ist es somit ausreichend, die Energieeinträge in den Auslesezellen, die das Myon durchquert sowie den Nachbarzellen zu berücksichtigen.

Bestimmung des notwendigen Summationsradius

Die pro Wegstrecke deponierte Energie von Myonen ist so gering, daß es zu einer starken Beeinflussung durch das Rauschen der Ausleseelktronik kommt (s. Abb. 6.11). Dadurch ist es nicht möglich, anhand des Energieeintrages die Auslesezelle eindeutig zu bestimmen, die

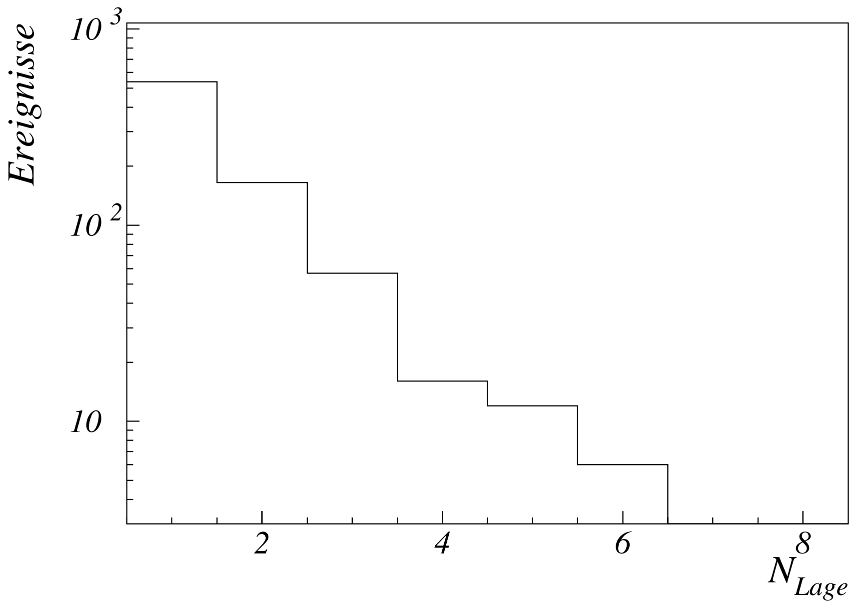


Abbildung 6.4: *Anzahl N_{Lage} der Auslesezellen in einer Schicht der Auslesezellen des BBEs, in denen Energiedepositionen des passierenden Myons zu finden sind; es werden simulierte Daten benutzt*

ein Myon in einer Schicht der Auslesezellen durchquert. Somit ist es notwendig, die vom Myon durchquerten Auslesezellen des LAr-Kalorimeters mit einer unabhängigen Methode zu bestimmen.

In der Analyse wird als Spur des Myons im LAr-Kalorimeter die direkte Verbindung der Punkte gewählt, an denen das vordere bzw. hintere instrumentierte Eisen durchquert wird [39]. Diese Methode, die Spur des Myons festzulegen, ist mit einigen Unsicherheiten behaftet:

- Die Punkte, an denen das Myon das instrumentierte Eisen durchquert, sind mit Unsicherheiten behaftet [16].
- Die Bewegung des Myons ist nicht linear innerhalb des LAr-Kalorimeters. Gründe hierfür sind die angesprochene Vielfachstreuung (s. Abschn. 6.1.4), sowie eine leichte Krümmung der Myon-Spur als Folge des äußeren Magnetfeldes.

Diese Unsicherheiten der Methode, die Spur des Myons zu bestimmen, müssen in der Analyse berücksichtigt werden. In der Analyse werden daher alle Auslesezellen als Zellen mit deponierter Energie gewertet, deren Mittelpunkt einen Abstand von der parametrisierten Spur hat, der kleiner als ein festgelegter Radius r_S ist [39].

r_S wird durch die Abwägung von zwei Effekten festgelegt:

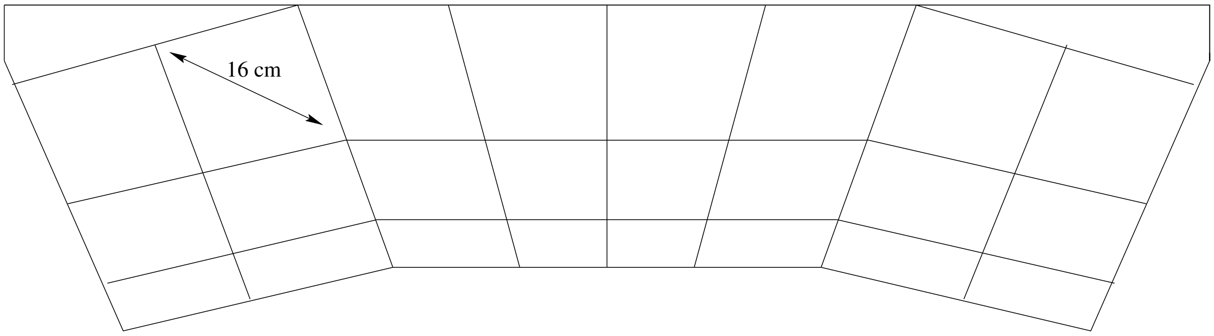


Abbildung 6.5: *Skizze einer Ausleseplatte des BBEs mit eingezeichneten Auslesezellen; die oberen Ecken links und rechts sind zwar mit Kupfer beschichtet, jedoch nicht als Auslesezellen in Gebrauch; angegeben ist der Durchmesser der Auslesezelle, anhand der r_s für das BBE festgelegt wird*

- Wird r_s zu klein gewählt, so kann es vorkommen, daß der Abstand zwischen der parametrisierten Spur und dem Mittelpunkt der Auslesezelle, die das Myon durchquert hat, größer als r_s wird. Das Myon-Signal würde damit fälschlich verworfen.

- Wird r_s zu groß gewählt, so werden die Signaleinträge von vielen Auslesezellen berücksichtigt, die daß Myon nicht durchquert hat. Diese zusätzlich berücksichtigten Signaleinträge entsprechen dem Rauschen der Auslesekanäle. Die Verteilung von $\frac{dQ}{dz}$ wird durch die vielen Einträge des Rauschen der Auslesezellen breit, ohne daß noch Anteile der vom Myon deponierten Energie hinzukommen.

Es hat sich gezeigt, daß r_S sinnvoll so groß gewählt wird, daß es dem einfachen bis doppelten des Abstandes der Ecken einer Auslesezelle vom Mittelpunkt der Auslesezelle entspricht. Bei Untersuchungen des BBEs wird r_S auf 8 cm gesetzt. Abbildung 6.5 zeigt die Segmentierung einer Ausleseplatte des BBEs. Die Distanz, aufgrund der r_s festgelegt wird, ist ebenso angegeben.

Es ist sinnvoll, nur Ereignisse in der Analyse zu betrachten, bei denen die parametrisierte Spur des Myons einen Mindestabstand r_D von den Kanten des untersuchten Moduls hat. Durch die Unsicherheit der parametrisierten Spur kann es ansonsten vorkommen, daß Ereignisse analysiert werden, in denen die parametrisierte Spur des Myons zwar durch das untersuchte Modul führt, die tatsächliche Spur des Myons jedoch am Modul vorbeigeht. r_D ist für jedes Kalorimeter-Rad unterschiedlich groß zu wählen, da die Unsicherheit der parametrisierten Spur in der Mitte zwischen den beiden instrumentierten Eisen am größten ist und nach außen hin abnimmt.

Bei Analysen von Daten des BBEs ist eine Korrektur von r_D notwendig. Der Grund dafür ist, daß die tatsächliche Form des BBEs und diejenige, welche in der H1-Datenbasis gespeichert ist, voneinander abweichen. Die Abstände von Punkten im BBE zu den Modulkanten werden daher falsch berechnet.

In Abbildung 6.6 sind die beiden Formen dargestellt. Die echte Form der Module des BBEs ist schattiert hervorgehoben. Es ist zu erkennen, daß die gespeicherte Form um ca. 13 % größer ist als die tatsächliche. In der Analyse werden die Abstände zu den Modulkanten

Abbildung 6.6: *Gegenüberstellung der Skizze einer echten Ausleseplatte des BBEs und der Parametrisierung in der Datenbasis; die echte Form ist schattiert hervorgehoben*

korrigiert.

6.5 Auswirkungen der Pedestalkorrektur

In Abschnitt 3.4 wird gezeigt, daß das in Rauschereignissen gefundene Pedestal Ped_{Run} in vielen Auslesekanälen deutlich von dem in der Kalibration bestimmten Ped_{Kalib} abweicht. Dabei wird auf die resultierende Nichtlinearität der Energieskala hingewiesen. Ebenso wird gezeigt (s. Abb. 3.8), daß die Standardabweichung der Verteilung von $Ped_{Run} - Ped_{Kalib}$ in einigen Sektionen groß ist.

In diesem Abschnitt erfolgt eine Überprüfung der in Rauschereignissen gefundenen Pedestal-Differenz. Weiterhin wird eine Auswirkung der großen Standardabweichung der Verteilung von $Ped_{Run} - Ped_{Kalib}$ in einzelnen Sektionen des LAr-Kalorimeters auf Analysen bei H1 gezeigt.

Untersucht werden Unterschiede in den gemessenen Werten von $\frac{dQ}{dz}$ zwischen den Modulen einer Sektion. Nach Formel 3.6 ist der Zusammenhang zwischen der gemessenen, in der Auslesezellen influenzierten Ladung Q_{inf} und dem Pedestal:

$$Q_{inf} = \sum_{i=1}^{3} (S_{ADC} - Ped_{Kalib})^i \cdot P_i \tag{6.6}$$

mit:

S_{ADC} $\hat{=}$ in den ADCs gemessenes Signal
P_i $\hat{=}$ Parameter des Polynoms der Ladungsrekonstruktion

Die Größe S_{ADC} des von den ADCs registrierten Signals kann dabei in $S_{ADC} = S'_{ADC} + Ped$ aufgespalten werden. S'_{ADC} bezeichnet dabei das Signal, daß hypothetisch ohne das überlagerte Pedestal (s. Abschn. 2.4.2) gemessen würde und Ped das aktuell gültige Pedestal. Damit ergibt sich aus Formel 6.6:

$$Q_{inf} = \sum_{i=1}^{3} (S'_{ADC} + Ped_{Run} - Ped_{Kalib})^i \cdot P_i \tag{6.7}$$

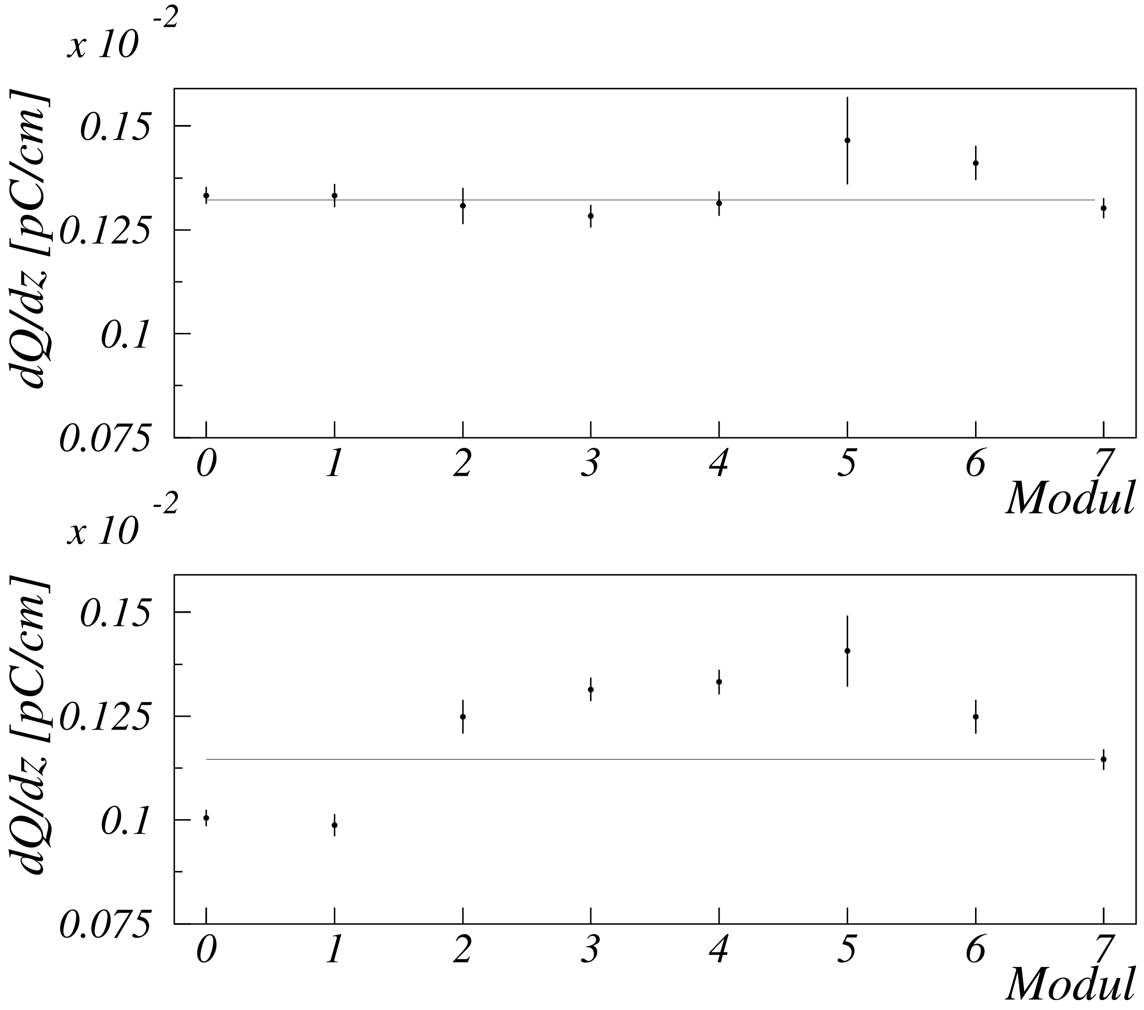


Abbildung 6.7: *Gemessener Energieverlust pro Weglänge* $\frac{dQ}{dz}$ *der Halo-Myonen in den acht Modulen des FB1H; oben: mit Korrektur der Pedestal-Differenz, unten: ohne Korrektur der Pedestal-Differenz; den Datenpunkten ist jeweils der angepaßte Mittelwert aller Module überlagert*

Für den Fall, daß $Ped_{Run} \neq Ped_{Kalib}$ ist, wird bei den gleichen Signalen der Auslesezellen, in zwei unterschiedlichen Auslesekanälen eine unterschiedliche Ladung Q_{inf} gemessen. Somit ändert sich auch die gemessene Größe $\frac{dQ}{dz}$.

Die einzelnen Sektionen des LAr-Kalorimeters sind aus jeweils acht sehr ähnlichen Modulen[3] zusammengesetzt (s. Abb. 2.4). Wenn $Ped_{Run} = Ped_{Kalib}$ ist, sollte daher kein

---

[3] Geplant war ein identischer Aufbau jeweils aller acht Module eines Rades. Genaue Untersuchungen zeigen jedoch, daß es leichte Unterschiede zwischen den Modulen gibt. Dieses kann durch die unterschied-

Unterschied zwischen den gemessenen Werten von $\frac{dQ}{dz}$ bestehen, die in unterschiedlichen Modulen einer Sektion gemessen werden.

Abbildung 6.7/unten zeigt den Mittelwert von $\frac{dQ}{dz}$ für alle acht Module des FB1H. Es ist zu erkennen, daß zwischen den in unterschiedlichen Modulen gemessenen Werten von $\frac{dQ}{dz}$ Unterschiede bestehen, die nicht durch die Unsicherheit der Daten erklärt werden können. Diese Unterschiede machen dabei bis zu einem Drittel des Absolutwertes aus.

Abbildung 6.7/oben zeigt ebenso den Mittelwert $\frac{dQ}{dz}$ für alle acht Module des FB1H. Im Unterschied zur Abbildung 6.7/unten wurde bei der Rekonstruktion der Halo-Myon-Ereignisse jedoch auf die in Abschnitt 3.4 festgestellte Pedestal-Differenz korrigiert. Es ist die deutliche Angleichung der Werte von $\frac{dQ}{dz}$ zu erkennen, die in unterschiedlichen Modulen gemessen werden. Es ist somit gezeigt, daß die großen Unterschiede im gemessenen $\frac{dQ}{dz}$ in Abbildung 6.7/unten durch die nicht korrigierte Pedestal-Differenz hervorgerufen werden.

Durch die in den Abschnitt 3.4 vorgestellte Korrektur der Differenz von $Ped_{Run} - Ped_{Kalib}$ ist eine Behebung der systematischen Unterschiede in den gemessenen Werten von $\frac{dQ}{dz}$ der unterschiedlichen Module möglich.

Bei den, in den folgenden Abschnitten dargestellten, Analysen wurde die Pedestal-Differenz korrigiert.

6.6 Auswirkungen des Upgrades

6.6.1 Erhöhung der Energieauflösung durch den Upgrade

Durch die reduzierten Rauschpegel der Auslesekanäle in Folge des Upgrades ist von einer verbesserten Energieauflösung auszugehen. Als Maß für die Änderung der Energieauflösung wird in diesem Abschnitt die Größe

$$\frac{\Delta RMS_{\frac{dQ}{dz}}}{RMS_{\left(\frac{dQ}{dz}\right)_{95}}} = \frac{RMS_{\left(\frac{dQ}{dz}\right)_{97}} - RMS_{\left(\frac{dQ}{dz}\right)_{95}}}{RMS_{\left(\frac{dQ}{dz}\right)_{95}}}$$

mit:

$RMS_{\left(\frac{dQ}{dz}\right)_{97}}$ $\hat{=}$ Breite der an die Verteilung von $\frac{dQ}{dz}$ angepaßte Normalverteilung für Daten der Datennahmeperiode 1997

$RMS_{\left(\frac{dQ}{dz}\right)_{95}}$ $\hat{=}$ Breite der an die Verteilung von $\frac{dQ}{dz}$ angepaßte Normalverteilung für Daten der Datennahmeperiode 1995

untersucht.

$RMS_{\frac{dQ}{dz}}$ bezeichnet dabei die Breite einer an die Verteilung von $\frac{dQ}{dz}$ angepaßten Normalverteilung. Als statistischer Prozeß kann die pro Wegstrecke von Myonen durch Ionisation deponierte Energie als normalverteilt angesehen werden. $RMS^2_{\frac{dQ}{dz}} = RMS^2_{Ion} + RMS^2_{\sigma}$

---

lichen Positionen der Module innerhalb eines Rades erklärt werden.

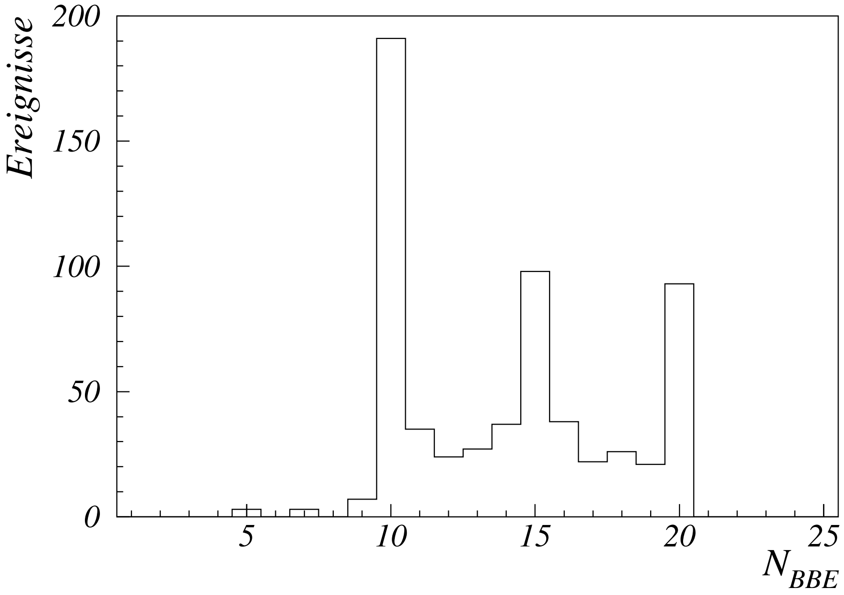


Abbildung 6.8: *Anzahl N_{BBE} der Auslesezellen des BBEs, deren Signal in einem Halo-Myon-Ereignis summiert wird*

setzt sich dabei aus einem Anteil RMS_σ^2 zusammen, der vom Rauschpegel der Auslesekanäle abhängt und einem Anteil RMS_{Ion}^2, der sämtlichen anderen Beiträge zur Breite der Verteilung enthält.

Vor der direkten Untersuchung der Änderung von $RMS_{\frac{dQ}{dz}}$ durch den Upgrade, erfolgt eine Abschätzung der erwarteten Änderung. Die Abschätzung ist dabei in vielen Aspekten auf das BBE bezogen und müßte für die anderen Bereiche des LAr-Kalorimeters zum Teil anders geführt werden:

- $\frac{dQ}{dz}$ berechnet sich bei der Untersuchung des BBE gemäß

$$\frac{dQ}{dz} = \sum_{i=1}^{N} \frac{Q_i}{d_{BBE}} \tag{6.8}$$

  mit:

  Q_i $\hat{=}$ gemessene Ladung einer Auslesezelle, deren Mittelpunkt näher als r_s an der parametrisierten Spur des Myons liegt
  d_{BBE} $\hat{=}$ Länge der Spur des Myons im BBE
  N $\hat{=}$ Anzahl der Auslesezellen, deren Mittelpunkt näher als r_s an der parametrisierten Spur des Myons liegt

- Der Beitrag RMS_σ der Rauschpegel der Auslesezellen zur Standardabweichung der Verteilung von $\frac{dQ}{dz}$ berechnet sich durch Gauß'sche Fehlerfortpflanzung aus Formel 6.8 zu:

$$RMS_\sigma = \frac{\sqrt{\sum_{i=1}^{N} \sigma^2_{\mathrm{Zelle_i}}}}{d_{\mathrm{BBE}}} \tag{6.9}$$

mit:

RMS_σ $\hat{=}$ Beitrag der Rauschpegel der Auslesezellen deren Mittelpunkt näher als r_s an der parametrisierten Myon-Spur liegt, zur Standardabweichung der Verteilung von $\frac{dQ}{dz}$

N $\hat{=}$ Anzahl der Auslesezellen, deren Mittelpunkt näher als r_s an der parametrisierten Myon-Spur liegt

$\sigma_{\mathrm{Zelle_i}}$ $\hat{=}$ Rauschpegel der Aulesezelle i [pC]

d_{BBE} $\hat{=}$ Länge der Spur des Myons im BBE

- In Abbildung 6.8 ist die Größe N_{BBE} aufgetragen. N_{BBE} bezeichnet dabei für einen Datensatz mit Halo-Myon-Ereignissen die Anzahl der Auslesezellen des BBEs, deren Mittelpunkt näher als r_s an der parametrisierten Spur des Myons liegt. Die Signale dieser Auslesezellen werden in der Berechnung von $\frac{dQ}{dz}$ berücksichtigt (s. Formel 6.8). Es ist zu erkennen, daß N_{BBE} fast ausschließlich zwischen 10 und 20 liegt. In seltenen Fällen ist es möglich, daß ein Myon die Ausleseplatten des BBEs so durchquert, daß in jeder Schicht der Auslesezellen im Radius r_s um die parametrisierte Myon-Spur nur der Mittelpunkt einer Auslesezelle ist. Da jedes Modul des BBEs 5 Lagen von Auslesezellen enthält, treten in wenigen Fällen 5 summierte Signale auf. Die drei Maxima der Verteilung bei $N_{BBE} = 10$, $N_{BBE} = 15$ und $N_{BBE} = 20$ entsprechen jeweils 2, 3 oder 4 Auslesezellen, deren Signale pro Lage der Auslesezellen des BBEs summiert werden.

  Abbildung 6.9 zeigt das nach Formel 6.9 berechnete RMS$_\sigma$. Dabei werden jeweils die Rauschpegel der N_{BBE} Auslesezellen berücksichtigt, die in Abbildung 6.8 dargestellt sind. Durch die verschieden großen Kapazitäten C_D der Auslesezellen innerhalb des BBEs sind in Abbildung 6.9 die scharfen Strukturen verschwunden, die in Abbildung 6.8 zu erkennen sind.

  Die abgeschätzte Größe von RMS_σ beträgt $RMS_\sigma \approx 4,9\,\frac{fC}{mm}$.

Abbildung 6.10 zeigt die Verteilung von $\frac{dQ}{dz}$ für die Datennahmeperioden 1995 (linke Abbildung) und 1997 (rechte Abbildung). Es sind jeweils die gemessenen Daten als Punkte und die simulierten Daten Histogramm aufgetragen. Bei den simulierten Daten der Datennahmeperioden 1995 und 1997 handelt es sich um die gleichen Halo-Myon-Ereignisse, denen bei der Rekonstruktion jedoch Rauschereignisse der unterschiedlichen Datennahmeperioden überlagert wurden.

In beiden Abbildungen ist eine annähernd gaußförmige Verteilung mit einem Mittelwert von ca. 2,4 $\frac{fC}{cm}$ zu erkennen. Diese entspricht der $\frac{dQ}{dz}$-Verteilung der Myonen, die das BBE minimalionisierend durchqueren.

Zusätzlich gibt es kleine Anhäufungen bei Werten von $\frac{dQ}{dz}$, die ungefähr Null sind. Hierbei handelt es sich um das gemessene $\frac{dQ}{dz}$ der Ereignisse, in denen die Signale der summierten Auslesezellen nur aus Rauschen bestehen. Diese Ereignisse sind fälschlich durch die

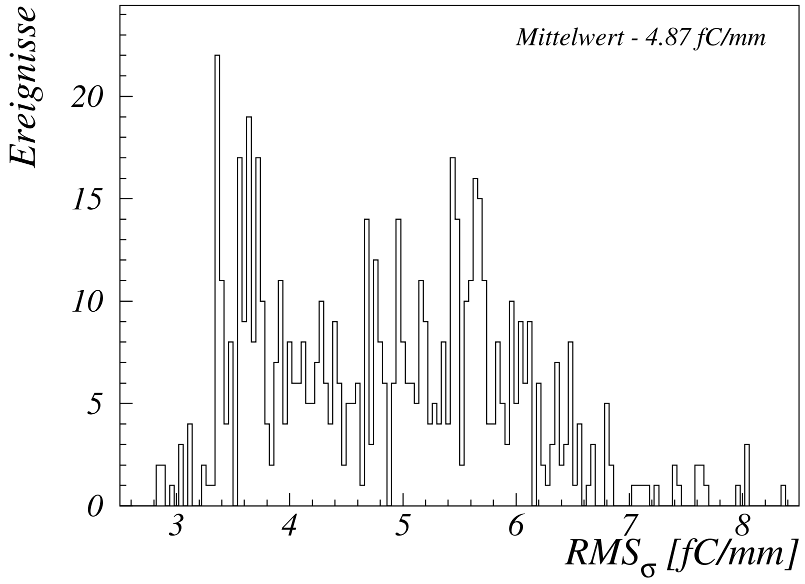


Abbildung 6.9: *Beitrag RMS_σ des Rauschens der Auslesezellen, die in einem Ereignis im BBE ausgelesen werden, zur Standardabweichung der Verteilung von* $\frac{dQ}{dz}$

Schnitte zur Reduktion des Untergrundes nicht verworfen worden. Es handelt sich um Ereignisse, in denen die tatsächliche Spur des Myons im LAr-Kalorimeter und die parametrisierte Spur sehr weit auseinanderliegen. Um den Anteil dieser Ereignisse weiter zu reduzieren, sind größere Werte von r_D notwendig. Eine Vergrößerung von r_D bewirkt jedoch eine Verringerung der Anzahl der Ereignisse, die in der Analyse zur Verfügung stehen. Aus der Datennahmeperiode 1995 sind so wenig Halo-Myon-Ereignisse aufgezeichnet, daß eine weitere Vergrößerung von r_D nicht möglich ist, ohne zu wenig Ereignisse für eine Analyse zur Verfügung zu haben.

Zu hohen Werten von $\frac{dQ}{dz}$ ist die Verteilung von $\frac{dQ}{dz}$ aufgeweitet. Zu dieser Aufweitung tragen Ereignisse bei, in denen ein Myon mehr Energie deponiert als für ein minimalionisierendes Myon zu erwarten ist [39]. Dieses kann durch das Auslösen von δ-Elektronen oder durch Bremsstrahlungsereignisse auftreten. Im Bereich um das Maximum der Verteilung läßt sich jedoch gut eine Normalverteilung anpassen.

An die in Abbildung 6.10 gezeigten Daten wurde mit Hilfe einer Maximum-Likelyhood-Anpassung eine Normalverteiung angepaßt. Aufgrund der kleinen Datenmenge liefert diese Anpassung deutlich stabilere Ergebnisse als eine χ^2-Anpassung. Die Anpassung wurde dabei im Bereich von $2\,\sigma$ um das Maximum der Normalverteilung vorgenommen. Die Breiten der angepaßten Normalverteilungen sind:

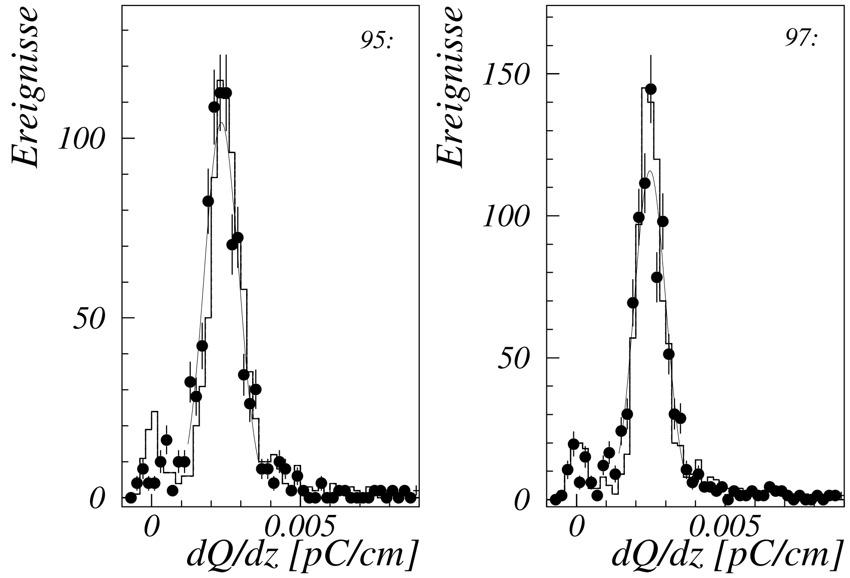


Abbildung 6.10: *Verteilung von $\frac{dQ}{dz}$ für die Datennahmeperioden 1995 (links) und 1997 (rechts); es sind jeweils die gemessenen Daten als Punkte und die simulierten Daten als Histogramm einander überlagert; zusätzlich ist eine an die gemessenen Daten angepaßte Normalverteilung eingetragen*

Datenpunkte 1995: $RMS_{\left(\frac{dQ}{dz}\right)_{Daten/95}} = 6,02 \pm 0,328\,\frac{fc}{mm}$

Simulation 1995: $RMS_{\left(\frac{dQ}{dz}\right)_{Sim/95}} = 5,09 \pm 0,156\,\frac{fc}{mm}$

Datenpunkte 1997: $RMS_{\left(\frac{dQ}{dz}\right)_{Daten/97}} = 5,18 \pm 0,271\,\frac{fc}{mm}$

Simulation 1997: $RMS_{\left(\frac{dQ}{dz}\right)_{Sim/97}} = 4,01 \pm 0,143\,\frac{fc}{mm}$

Es ist zu erkennen, daß das $RMS_{\frac{dQ}{dz}}$ der simulierten Daten stets deutlich unter dem der gemessenen Daten liegt. Dieses kann durch Unterschiede zwischen den gemessenen und den simulierten Daten erklärt werden:

- Die Myonen der simulierten Daten stammen aus einem festen Energeintervall, welches kleiner als das der Myonen der gemessenen Daten
- Die nominelle Spannung zwischen der HV- und der Ausleseplatte beträgt im LAr-Kalorimeter nominell 1,5 kV. Aufgrund von Problemen, muß die Spannung in einigen Bereichen des LAr-Kalorimeters jedoch verringert werden. Durch die verringerte Spannung resultiert eine niedrigere Ladungssammlung bei der gleichen Energiedeposition eines Teilchens [39]. Dieses wird durch eine Parametrisierung ausgeglichen. Innerhalb der Simulation wird davon ausgegangen, daß stets die gesammte erzeugte Ladung an den Ausleseplatten gesammelt wird. Es ist dankbar, daß Parametrisie-

rung nicht perfekt arbeitet und es dadurch zu einem Unterschied zwischen gemessenen und simulierten Daten kommt.

- Bei der Analyse wird die Pedestal-Differenz korrigiert. Es ist anzunehmen, daß die Korrektur nicht zu einem perfekten Ausgleich der Pedestal-Differenz führt. Für simulierte Daten tritt dieses Problem nicht auf.

Weiterhin ist zu erkennen, daß die Größe $RMS_{\frac{dQ}{dz}}$ bei den Daten aus 1997 stets kleiner ist als in 1995. Im folgenden wird untersucht, inwieweit die Änderung des Anteils RMS_σ zwischen den Datennahmeperioden 1995 und 1997 in den gemessenen und den simulierten Daten gleich ist. Hierzu wird die Größe $\Delta RMS^2_{\frac{dQ}{dz}} = RMS^2_{\left(\frac{dQ}{dz}\right)_{95}} - RMS^2_{\left(\frac{dQ}{dz}\right)_{97}}$ für gemessene und simulierte Daten untersucht. Dabei wird angenommen, daß der Anteil RMS_σ in beiden Datennahmeperioden gleich groß ist:

$$\begin{aligned}
\Delta RMS^2_{\frac{dQ}{dz}} &= RMS^2_{\left(\frac{dQ}{dz}\right)_{95}} - RMS^2_{\left(\frac{dQ}{dz}\right)_{97}} \\
&= \left(RMS^2_{\mathrm{Ion}} + RMS^2_{\sigma 95}\right) - \left(RMS^2_{\mathrm{Ion}} + RMS^2_{\sigma 97}\right) \\
&= RMS^2_{\sigma 95} - RMS^2_{\sigma 97}
\end{aligned}$$

mit:

$RMS_{\left(\frac{dQ}{dz}\right)_{95/97}}$ ≙ Breite der an die Verteilung von $\frac{dQ}{dz}$ angepaßte Normalverteilung für Daten aus 1995 bzw. 1997

$\Delta RMS_{\frac{dQ}{dz}}$ ≙ Änderung von $RMS_{\frac{dQ}{dz}}$ zwischen den Datennahmeperioden 1995 und 1997

RMS_{Ion} ≙ Anteil von $RMS_{\frac{dQ}{dz}}$, der nicht vom Rauschen der Auslesezellen stammt

$RMS_{\sigma 95/97}$ ≙ Anteil von $RMS_{\frac{dQ}{dz}}$, der durch das Rauschen in den Auslesezellen bewirkt wird, für die Datennahmeperioden 1995 und 1997

$\Delta RMS^2_{\frac{dQ}{dz}}$ berechnet sich für gemessene und simulierte Daten zu:

$$\Delta RMS^2_{\left(\frac{dQ}{dz}\right)_{Sim}} = 9,4 \pm 4,8 \left(\frac{fC}{mm}\right)^2 \quad \text{- für simulierte Daten}$$

$$\Delta RMS^2_{\left(\frac{dQ}{dz}\right)_{Daten}} = 9,8 \pm 2,0 \left(\frac{fC}{mm}\right)^2 \quad \text{- für gemessene Daten}$$

Die in der Simulation erhaltenen Ergebnisse von $\Delta RMS^2_{\frac{dQ}{dz}}$ stimmen im Rahmen der Fehler mit der Änderung bei den gemessenen Daten überein. Dieses bedeutet, daß die Änderung von RMS_σ in den gemessenen Daten von der Simulation gut beschrieben wird.

Die Größe $\frac{\Delta RMS_{\frac{dQ}{dz}}}{RMS_{\left(\frac{dQ}{dz}\right)_{Daten/95}}} = \frac{RMS_{\left(\frac{dQ}{dz}\right)_{Daten/97}} - RMS_{\left(\frac{dQ}{dz}\right)_{Daten/95}}}{RMS_{\left(\frac{dQ}{dz}\right)_{Daten/95}}}$ läßt sich mit Hilfe der oben angegebenen Werte von $RMS_{\left(\frac{dQ}{dz}\right)_{Daten/97}}$ und $RMS_{\left(\frac{dQ}{dz}\right)_{Daten/95}}$ zu 14% ± 6,5% berechnen. Dieses ist deutlich weniger als die mittlere Reduktion der Rauschpegel, die in Abschnitt 5.2.1 zu 37 % bestimmt wurde.

Die gute Übereinstimmung der gemessenen Änderung von RMS_σ mit den in der Simulation vorhergesagten, bestätigt jedoch das erhaltene Ergebnis. Der Unterschied zwischen der Reduktion des Rauschpegels und der Verringerung von $RMS_{\frac{dQ}{dz}}$ läßt sich durch den Anteil RMS_{Ion} erklären. Im naiven Modell für RMS_σ, daß zu Beginn des Abschnitts betrachtet wurde, beträgt der erwartete Wert von RMS_σ 4,8 $\frac{fC}{mm}$ (s. Abb. 6.9). Dieses sind nur ca. 79 % des Wertes von $RMS_{\frac{dQ}{dz}}$. Hieraus folgt eine Abschätzung der erwarteten Änderung von $\frac{\Delta RMS_{\frac{dQ}{dz}}}{RMS_{\left(\frac{dQ}{dz}\right)_{Daten/95}}} \approx 20\,\%$. Dieses liegt zwar oberhalb des gemessenen Wertes, bei den großen Fehlern von $\frac{\Delta RMS_{\frac{dQ}{dz}}}{RMS_{\left(\frac{dQ}{dz}\right)_{Daten/95}}}$ zeigt jedoch auch die Abschätzung eine passable Übereinstimmung mit den Meßdaten.

6.6.2 Auswirkungen des Upgrades auf die Nullpunktsunterdrückung

Die Nullpunktsunterdrückung NPU bei der Signalauslese hat bei Ereignissen besonders starke Auswirkungen, in denen solch geringe Energien in Auslesezellen deponiert werden, wie es bei Myonen geschieht.

Abbildung 6.11 zeigt die in Halo-Myon-Ereignissen in den Auslesezellen des BBEs gemessenen, influenzierten Ladungen Q_{inf}. In der Abbildung werden nur die Auslesezellen berücksichtigt, deren Mittelpunkt einen Abstand zur parametrisierten Spur des Myons von weniger als 8 cm hat. Die Daten der Datennahmeperioden 1995 (linke Abbildung) und 1997 (rechte Abbildung) sind getrennt aufgetragen.

In beiden Diagrammen ist eine Verteilung mit dem Mittelwert von 0 zu erkennen. Die zu dieser Verteilung beitragenden Einträge stammen aus Auslesezellen, die nur Rauschen enthalten. Die Mittelpunkte dieser Auslesezellen befinden sich jedoch im 8 cm-Radius um die parametrisierte Spur des Myons und werden daher berücksichtigt. Bei den '97er Daten ist eine zweite Verteilung mit einem Mittelwert von ca. 27 fC zu erkennen. Diese Einträge entsprechen den Signalen der Auslesezellen, in denen vom Myon Energie deponiert wurde. In den '95er Daten ist diese zweite Verteilung nicht deutlich getrennt von der Verteilung der Rauschsignale zu erkennen. Durch die höheren Rauschpegel der Auslesekanäle vor der Erneuerung der Vorverstärker sind beide Verteilungen so breit, daß sie sich weitgehend überlagern.

Die in den Abbildungen eingezeichneten, gestrichelten Linien, entsprechen einem mittleren Wert von $\pm 2\,\sigma_{\mathrm{Zelle}}$ für das BBE. Hierbei bezeichnet σ_{Zelle} den Rauschpegel eines Auslesekanals. Im Bereich des CBs werden bei der NPU, wie erwähnt, Schwellenwerte von $2\sigma_{Zelle}$ verwendet. Es ist zu erkennen, daß bei den angewandten Schwellenwerten der NPU ein Teil des Signals der Myonen verworfen wird.

Als Maß für den Anteil des Signals, das durch die NPU verworfen wird, wird die Größe

$$\frac{\Delta Q}{Q_0} = \frac{Q(H_{NPU}) - Q_0}{Q_0}$$

untersucht. $Q(H_{NPU})$ bezeichnet dabei die influenzierte Ladung, die bei einem variablen Schwellenwert H_{NPU} der NPU gemessen wird. Q_0 bezeichnet die gemessene influenzierte Ladung, wenn die Schwellen der NPU auf Null gesetzt sind.

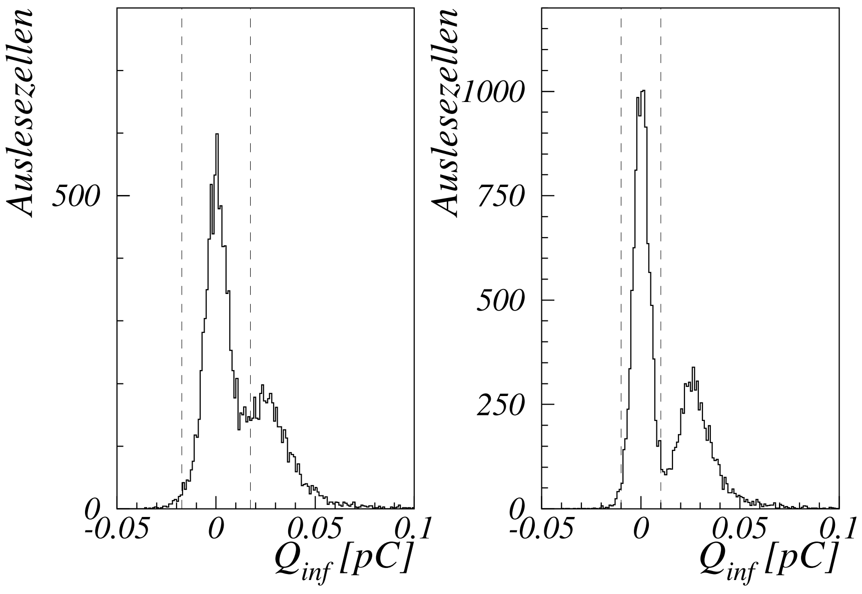


Abbildung 6.11: *Verteilung der gemessenen Ladung Q_{inf} in den Auslesezellen des BBEs, deren Mittelpunkt einen Abstand von weniger als 8 cm von der parametrisierten Myon-Spur hat; links: Daten aus der Datennahmeperiode 1995; rechts: Daten aus der Datennahmeperiode 1997; die gestrichelte Linien entsprechen jeweils dem zweifachen des Rauschpegels σ_{Zelle} der Auslesekanäle des BBEs*

Abbildung 6.12 zeigt den Zusammenhang zwischen $\frac{\Delta Q}{Q_0}$ und H_{NPU}. H_{NPU} wird dabei in Einheiten von σ_{Zelle} varriiert. Es ist $\frac{\Delta Q}{Q_0}$ für die Datennahmeperioden 1995 und 1997 dargestellt.

Es ist zu erkennen, daß die Abhängigkeit der Größe $\frac{\Delta Q}{Q_0}$ von H_{NPU} in den Daten von 1995 ausgeprägter ist als in 1997. Dieses führt dazu, daß in der Datennahmeperiode 1995 bei dem Schwellenwert von $2\,\sigma_{Zelle}$ 5,6 % des Signals der Myonen verworfen werden. In der Datennahmeperiode 1997 werden dagegen 2 % des Myon-Signals verworfen. In dem unterschiedlich großen Anteil gemessener Ladungen zwischen den Datennahmeperioden 1995 und 1997 zeigt sich der große Gewinn, der bislang in der Signalauslese durch den Upgrade erzielt wird.

Wie erwähnt sind die Schwellenwerte der *NPU* im FB auf 2,5 σ_{Zelle} gesetzt. Daher sind dort durch die Änderungen an der Ausleseelektronik in der dritten Phase des Upgrades noch deutlichere Verbesserungen zu erwarten. In Abbildung 6.12 ist zu erkennen, daß im BBE bei angenommenen Schwellenwerten von 2,5 σ_{Zelle} durch den Upgrade ca. 7 % mehr Signal gemessen wird.

In den Abbildungen 6.13 und 6.14 ist eine weitere Auswirkung einer guten Trennung von niederenergetischen Signalen und Rauschen zu erkennen. Bei Ereignissen, in denen schwere

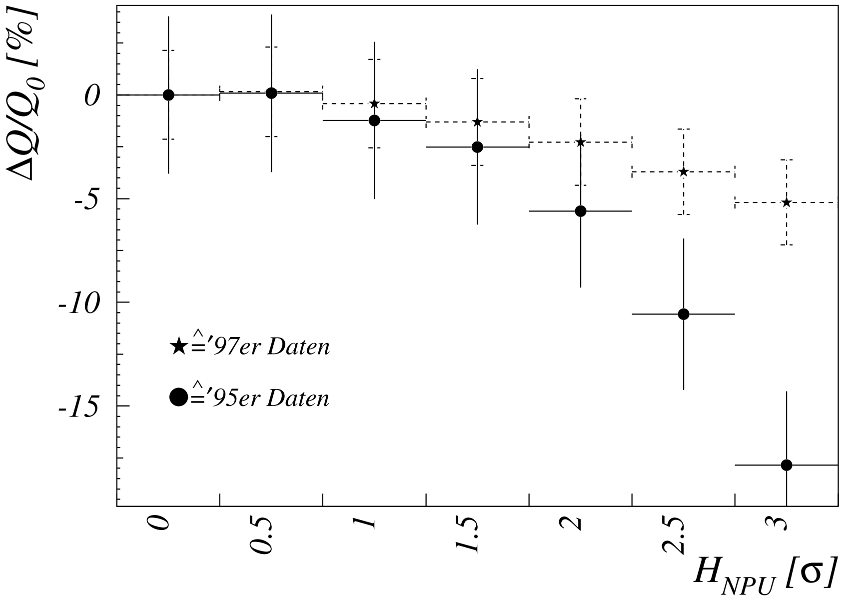


Abbildung 6.12: *Anteil* $\frac{\Delta Q}{Q_0}$ *des in der Auslese verworfenen Signals in Abhängigkeit von der Schwelle* H_{NPU} *der Nullpunktsunterdrückung;* H_{NPU} *wird dabei in Einheiten des Rauschpegels* σ_{Zelle} *der Auslesezellen variiert;* Q_0 *bezeichnet das Signal, das gemessen wird, wenn die NPU auf 0 gesetzt ist;* ΔQ *bezeichnet die Differenz zwischen der Ladung, die bei einer bestimmten* H_{NPU} *gemessen wird und* Q_0

Quarks produziert werden, treten durch den schwachen Zerfall der Quarks häufig Myonen auf. Um die Myonen in der Analyse zu verwenden ist es notwendig, diese durch das LAr-Kalorimeter oder das instrumentierte Eisen nachzuweisen. Abbildung 6.13 zeigt, daß der Myon-Nachweis mit Hilfe des LAr-Kalorimeters im Normalfall schwer möglich ist. Bei dem in der Abbildung unteren der beiden Myonen wird nur ein einzelner Energieeintrag im LAr-Kalorimeter gemessen. Dieser einzelne Energieeintrag wird in Analysen normal nicht berücksichtigt, da angenommen wird, daß es sich um einen Signaleintrag aufgrund des Rauschens der Ausleseelektronik handelt. Der Nachweis dieses unteren Myons gelingt nur mit Hilfe des instrumentierten Eisens. In Abbildung 6.13 ist zu erkennen, daß das instrumentierte Eisen deutliche Hinweise auf ein passierendes Teilchen enthält.

Abbildung 6.14 [70] zeigt ein Ereignis, in dem das instrumentierte Eisen jedoch nicht ausreichend ist, um das in dem Ereignis auftretende Myon nachzuweisen. Das Myon hinterläßt im instrumentierten Eisen nur einen einzelnen Eintrag. Dieser führt zu keiner Spurrekonstruktion. Daher ist es notwendig, daß die Energiedepositionen des Myons im LAr-Kalorimeter klar aufgelöst werden können, um anhand der deponierten Energien die Spur zu rekonstruieren. Abbildung 6.14 zeigt ein Ereignis, in dem dieses möglich ist. Es ist in der Abbildung deutlich die Spur des Myons im LAr-Kalorimeter zu erkennen.

Eine solch klare Trennung der niederenergetischen Signale vom Rauschen ist bislang normal nicht möglich. Das Ereignis wurde aufgezeichnet, als in der Vorwärtsregion des LAr-Kalorimeters Änderungen an Teilen der Ausleseelektronik vorgenommen wurden [14]. Auf diese Änderungen soll hier nicht weiter eingegangen werden. In Folge der Änderungen wurde der Rauschpegel in den Auslesekanälen jedoch so stark reduziert, daß es möglich wurde, ein Myon mit Hilfe des LAr-Kalorimeters nachzuweisen.

Auch unter dem Aspekt des Teilchennachweises sind durch die reduzierten Rauschpegel als Folge des Upgrades deutliche Steigerungen zu erwarten.

6.6.3 Auswirkungen des Upgrades auf den Trigger

Anhand von Vorstudien für den Upgrade wurde der größte Gewinn durch die Reduktion der Rauschpegel bei den Triggerentscheidungen erwartet.

Abbildung 6.15 aus dem Upgrade-Vorschlag [53] zeigt die Effizienz eines Triggers, der nach Ereignissen des Typs $J/\Psi \to e^+e^-$ sucht, in Abhängigkeit der gemessenen, deponierten Energie der Elektronen (Elektron-Cluster-Energie). Der verwendete Trigger sucht nach Hinweisen für den Prozeß $J/\Psi \to e^+e^-$ anhand der gemessenen Energie in den BTs des LAr-Kalorimeters. Die Effizienz des Triggers ist für drei unterschiedliche Konfigurationen der Ausleseelektronik dargestellt. ● bezeichnet die Effizienz des Triggers für den Zustand vor dem Upgrade. Mit den Symbolen □ und ❍ sind die erwarteten Effizienzen für eine teilweise bzw. eine komplette Erneuerung der Ausleseelektronik aufgetragen. Es ist die erwartete, starke Erhöhung der Effizienz durch den Upgrade zu erkennen.

In diesem Abschnitt wird die durch die neuen Vorverstärker aufgetretene Änderung in der Effizienz eines Triggers untersucht, der auf Energieeinträge im LAr-Kalorimeter sensitiv ist.

Im Rahmen der Arbeit wird hierzu ein Trigger simuliert, der Teilchen anhand der im LAr-Kalorimeter deponierten Energie nachweist. Dabei wird untersucht, inwieweit Halo-Myonen, die das BBE durchqueren, anhand der in den BTs des BBEs deponierten Energie vom Trigger erfaßt werden. Hierzu wird das Signal S_{BT} im BT des BBEs, der vom Myon durchquert wird, mit dem Rauschpegel σ_{BT} des BTs verglichen. Wenn für S_{BT} gilt:

$$S_{\mathrm{BT}} > n \cdot \sigma_{\mathrm{BT}} \tag{6.10}$$

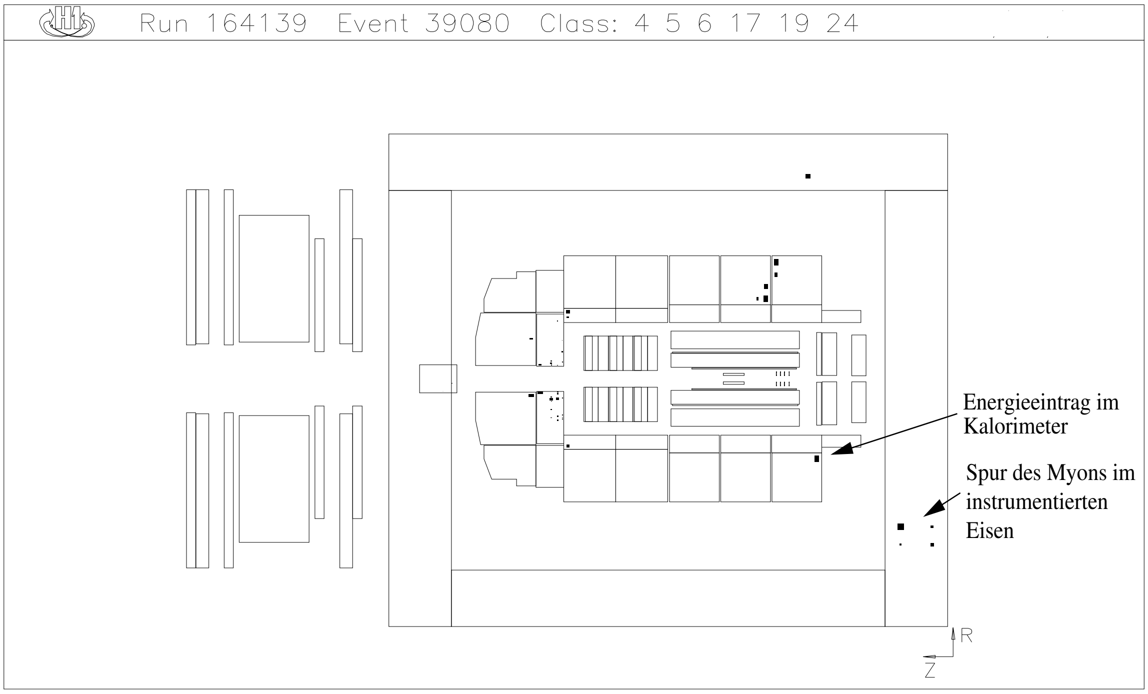
S_{BT} $\hat{=}$ gemessenes Signal im durchquerten BT
σ_{BT} $\hat{=}$ Rauschpegel des durchquerten BTs
n $\hat{=}$ variable Schwellenhöhe

wird das Ereignis behalten, ansonsten verworfen.

Um die Rate abzuschätzen, mit welcher der Trigger ein Ereignis passieren läßt, in dem in den Auslesezellen des LAr-Kalorimeters nur Rauschen zu finden ist, werden mit dem simulierten Trigger auch Rauschereignisse untersucht. Bei den untersuchten Rauschereignissen ist die Forderung abgewandelt, bei der ein Ereignis den Trigger passiert. Es wird verlangt, daß in einem der 8 BTs des BBEs[4] die Forderung aus Formel 6.10 erfüllt ist.

---

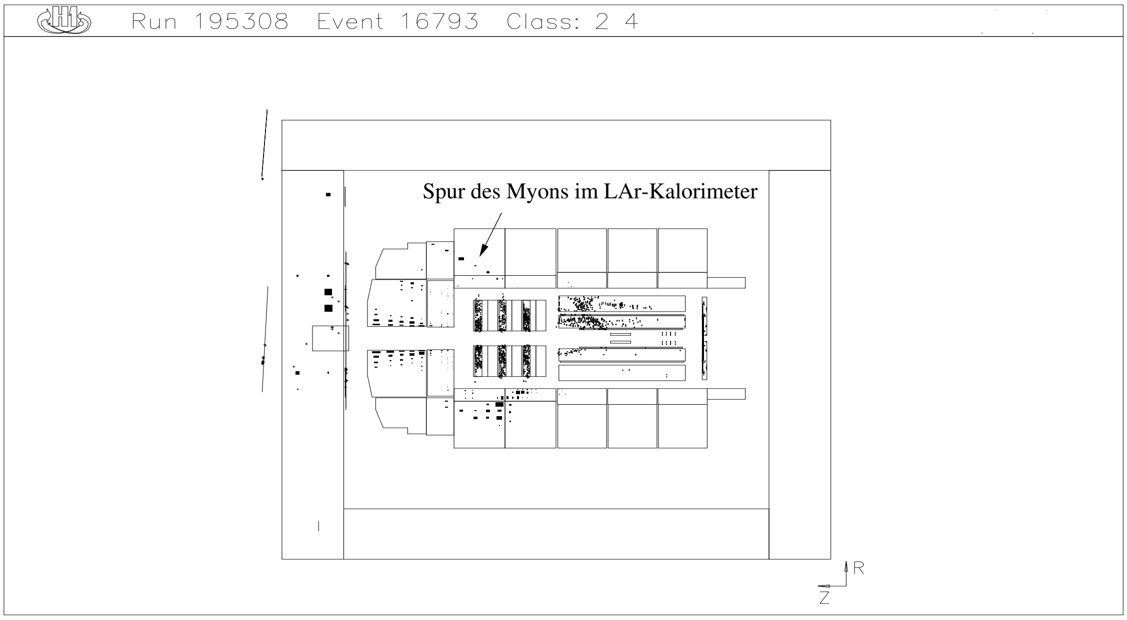
[4] Jedem der acht Module des BBE ist ein BT zugeordnet



Energieeintrag im Kalorimeter

Spur des Myons im instrumentierten Eisen

Abbildung 6.13: *Ereignis, in dem eines der beiden Myonen so wenig Energie im LAr-Kalorimeter deponiert, daß der Nachweis nur mit Hilfe des instrumentierten Eisens erfolgen kann.*



Spur des Myons im LAr-Kalorimeter

Abbildung 6.14: *Ereignis, in welchem die Rekonstruktion der Spur des Myons erst durch die Hilfe des im Rauschen reduzierten Kalorimeters möglich wird*

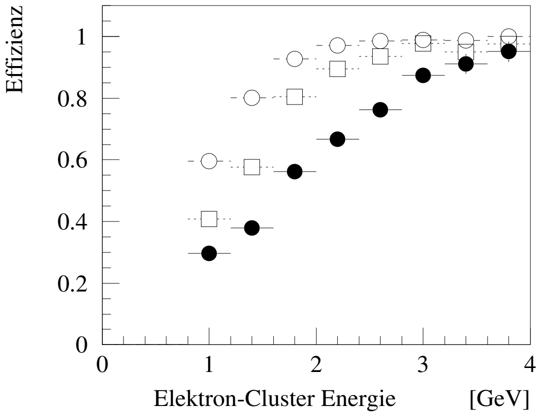


Abbildung 6.15: *Abhängigkeit der Effizienz eines Triggers für den Nachweis von* $J/\psi \rightarrow e^+e^-$ *aufgrund der gemessenen Energie in den BTs des LAr-Kalorimeters; ●: Stand vor dem Upgrade, □: Erwartung für den Fall einer teilweisen Erneuerung, ❍: Erwartung für den Fall einer kompletten Erneuerung [53]*

Anderenfalls wird das Ereignis verworfen.

Abbildung 6.16 zeigt das Ergebnis der Untersuchung. Es ist die Effizienz mit der Ereignisse den Trigger passieren, für verschiedene Schwellenwerte des Triggers aufgetragen. Die Schwellenwerte des Triggers werden dabei in Einheiten des Rauschens σ_{BT} der BTs verändert. Aufgetragen sind die Effizienzen, mit der Halo-Myon-Ereignisse der Datennahmeperioden 1995 (●) und 1997 (★) den Trigger passieren. Als drittes ist die Effizienz aufgetragen, mit der Rauschereignisse (❋) den Trigger passieren. Da die Triggerschwellen in Einheiten von σ_{BT} verändert werden, wird die Effizienz, mit der Rauschereignisse den Trigger passieren, durch die Reduktion der Rauschpegel nicht geändert.

Die Effizienz mit der Rauschereignisse den Trigger passieren ermöglicht eine Festlegung der Schwellenwerte, die im Trigger sinnvoll einzusetzen sind, damit nicht unnötig häufig ein Ereignis, in dem nur Rauschen ist, den Trigger passiert. Es ist zu erkennen, daß bei Schwellen bis zu 2,5 σ_{BT} die Rauschereignisse mit einer höheren Effizienz den Trigger passieren als die Myon-Ereignisse. Diese Schwellenwerte werden noch häufig durch den Energieeintrag erreicht, der durch das Rauschen in einem BT zu finden ist. Der Faktor 8 an betrachteten BTs in Rauschereignissen im Vergleich zu den Myon-Ergeinissen kann bei diesen Schwellenwerten noch nicht durch die Energie ausgeglichen werden, die zusätzlich zum Rauschen bei Halo-Myon-Ereignissen in den BTs gemessen wird. Ab Schwellenwerten des Triggers von 3 σ_{BT} werden die Rauschereignisse immer effektiver zurückgehalten. Bei diesen Schwellen wirkt sich die von den Myonen im Bereich der BTs deponierte Energie aus. Die Myon-Ereignisse werden bis zu den höchsten betrachteten Schwellen noch mit

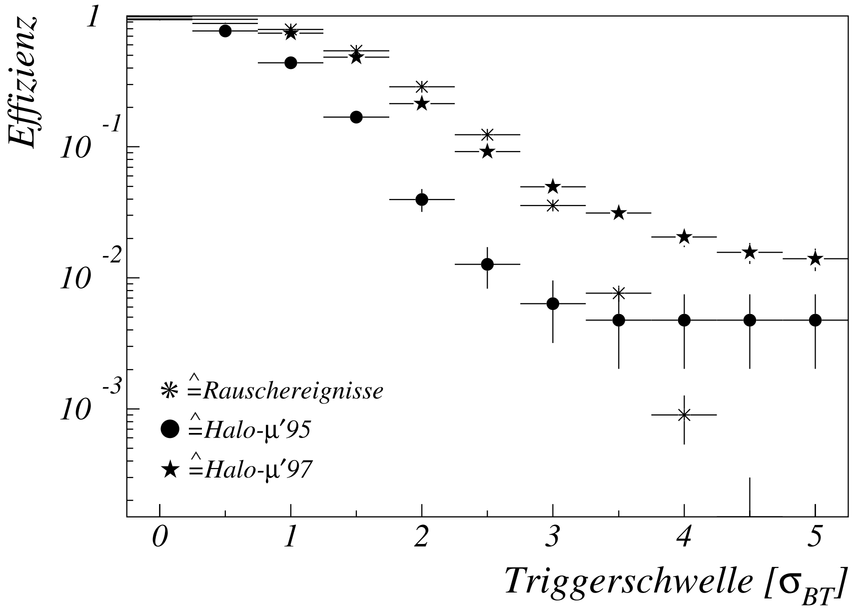


Abbildung 6.16: *Effizienz eines simulierten Triggers, der Teilchen anhand der in den BTs des LAr-Kalorimeters deponierten Energie nachweist, für den Nachweis von Halo-Myonen, die das BBE passieren; die Schwellenwerte des Triggers sind in Einheiten des Rauschpegels σ_{BT} der BTs verändert worden; zum Vergleich sind die Effizienzen für Myon-Ereignisse der Datennahmeperioden 1995 und 1997, sowie für Rauschereignisse aufgetragen*

ca. 1 % Effizienz nachgewiesen.

Die Myon-Ereignisse aus der Datennahmeperiode 1997 passieren dabei mit deutlich größerer Effizienz den Trigger als die Myon-Ereignisse der Datennahmeperiode 1995. Bei Schwellenwerten von 2,5 σ_{BT} beträgt das Verhältnis 9 : 1. Auch bei den Schwellenwerten, die für praktische Zwecke interessant sind, ist die deutlich höhere Effizienz des Triggers bei den '97er Daten zu erkennen. Daß der Unterschied bei hohen Schwellen kleiner wird, ist eine Verzerrung des eigentlichen Zustandes. Die Anzahl der Halo-Myon-Ereignisse aus der Datennahmeperiode 1995 ist so gering, daß ab Schwellenwerten von 3,5 σ_{BT} nur noch 4 Ereignisse den Trigger passieren. In diesen wird jeweils ein elektromagnetischer Schauer angeregt, in dem so hohe Energiedepositionen auftreten, daß alle Schwellenwerte des Triggers überschritten werden. Dieses ist kein repräsentatives Verhalten. Bei den '97er Daten ist die Datenmenge so groß, daß das leichte Sinken der Effizienz bei höheren Schwellen zu erkennen ist.

Die durch den Upgrade deutlich gesteigerte Trigger-Effizienz für Teilchen mit geringen Energiedepositionen, ist gut zu erkennen.

Kapitel 7

Zusammenfassung und Ausblick

Daten des LAr-Kalorimeters stellen einen wichtigen Bestandteil vieler Analysen bei H1 dar. Die Güte und Verfügbarkeit der Signale ist daher entscheidend für die Beantwortung physikalischer Fragestellungen bei H1.

In dieser Arbeit wurden zwei Aspekte aufgegriffen, welche für die Güte der Daten des LAr-Kalorimeters entscheidend sind. Es wurden dazu Untersuchungen angestellt und teilweise Verbesserungen vorgeschlagen bzw. angebracht: Im Bereich kleiner Signale zeigte es sich, daß bislang nicht erkannte Fehlerquellen in der Energierekonstruktion vorhanden waren. Hier ist die Differenz zu nennen, die zwischen dem in der Kalibration bestimmten und dem in der Datennahme gültigen Pedestal besteht. Unkorrigiert resultieren aus dieser Differenz Fehler der Energieskala im Prozentbereich. Weiterhin zeigte sich, daß das Ansprechen der Ausleseelektronik auf kleine Signale ein anderes ist als auf höhere. Es findet sich ein mittlerer Unterschied von 0,6 % im Signal-Ladungs-Zusammenhang. Für beide Auffälligkeiten wurden Korrekturroutinen entwickelt, wobei die Auswirkungen der Routine für die Pedestalkorrektur derzeit in größerem Rahmen untersucht werden. Zudem wurde die Notwendigkeit gezeigt, bei Änderungen in der Ausleseelektronik die Extrapolationsfaktoren von warmer zu kalter Kalibration zu überprüfen.

Als zweiter Punkt wurde aktiv am Upgrade-Programm zur Verringerung des Rauschens der Ausleseelektronik des LAr-Kalorimeters teilgenommen. Dabei wurden die Rauschquellen der Elektronik untersucht und die in den ersten beiden Phasen des Upgrades erzielten Erfolge, aber auch die aufgetretenen Probleme, dokumentiert. Es zeigte sich, daß der Upgrade im Auslesezweig als erfolgreich zu bewerten ist. Im Bereich neuer Vorverstärker wird das Signal-Rausch-Verhältnis zum Teil um mehr als einen Faktor zwei erhöht. Die Bereiche des Kalorimeters, in denen die Vorwiderstände der Analogkarten entfernt wurden, zeigen mit einer Reduktion der Rauschpegel von bis zu 17 % ein gutes Ergebnis. Die geringe Zahl defekter Auslesekanäle bestätigt, daß bei sorgsamer Arbeit die Veränderungen an der Ausleseelektronik gut praktikabel sind. Eine Bewertung der Auswirkung des Upgrades auf die Rauschpegel im Triggerzweig ist zum derzeitigen Zeitpunkt nicht abschließend möglich. Mit einer Reduktion der Rauschpegel in den Bereichen erneuerter Vorverstärker von im Mittel 32 % zeichnet sich jedoch ein schlechteres Ergebnis als im Auslesezweig ab. Eine Beurteilung der Änderungen in den Bereichen, in denen die Vorwiderstände der Analogkarten verändert wurden, ist erst anhand der im Winter 1997/98 erfolgenden 3. Phase des Upgrades möglich.

Des weiteren wurden Auswirkungen des Upgrades und der Pedestal-Verschiebung auf die Datennahme und auf Analysen bei H1 anhand von Halo-Myon-Ereignissen untersucht. Es zeigt sich, daß eine Korrektur der gemessenen Energiedepositionen auf die Pedestal-Differenz zwingend notwendig ist. Die z.T. deutlich verbesserten Bedingungen für Datennahme und Analyse als Folge des Upgrades werden gezeigt. Aufgrund der geringeren Rauschpegel ist eine niedrigere Nullpunktsunterdrückung notwendig. Dieses bewirkt, daß 3,6 % mehr Signal gemessen wird. Weiterhin wird die deutlich erhöhte Effizienz eines Triggers gezeigt, der Teilchen anhand der deponierten Energie im LAr-Kalorimeter nachweist. Es ergibt sich eine Erhöhung der Effizienz für Physik-Ereignisse bis zu einem Faktor neun bei gleichbleibender Rate an Untergrund.

In der Winterpause 1997/98 erfolgt die dritte Phase des Upgrades. Es werden sich durch die großflächige Reduktion der Rauschpegel für Untersuchungen von Jets mit kleinem Transversalimpuls, für ,,open charm"-Produktion und Photoproduktion ganz neue Dimensionen eröffnen. Auch Untersuchungen von J/Ψ-Zerfällen werden erstmalig mit höherer Statistik möglich sein.

Anhang A

Zeitlicher Ablauf des Upgrades

Okt'95: Zu Testzwecken werden in einigen Bereichen des CB die Analogkarten mit neuen Vorverstärkern bestückt und dort ebenso die Vorwiderstände entfernt. Die veränderten Bereiche sind die Regionen der Großtürme 214 und 215 und die Module 2 und 3 des BBE

Dez.'95: Die Testinstallation der Vorverstärker wird wieder entfernt

Feb.'96: Die Analogkarten des BBE werden zum Teil mit neuen Vorverstärkern bestückt und die Vorwiderstände der Analogkarten entfernt

Apr.'96: In den Triggerzellen 4083-4140 des CB1/CB2 werden die Vorwiderstände der Analogkarten verändert:

- In den TCs der elektromagnetischen Sektionen werden die Widerstände entfernt
- In den TCs des hadronischen Großturms 214 werden die Widerstände auf $2\,\Omega$ reduziert
- In den TCs des hadronischen Großturms 215 werden die Widerstände auf $1\,\Omega$ reduziert

Jun.'96: Die Erneuerung der Ausleseelektronik des BBE wird abgeschlossen

Jan.'97: Im Bereich BT-Θ13 des CB1E werden die Analogkarten mit neuen Vorverstärkern ausgerüstet und die Vorwiderstände entfernt

Jan.-Mar.'98: Die Erneuerung der Ausleseelektronik wird komplettiert:

- In den Auslesezellen elektromagnetischer Sektionen, deren Kapazität größer $5\,\mathrm{nF}$ ist, werden neue Vorverstärker eingesetzt und die Vorwiderstände entfernt
- In den restlichen Auslesezellen des CBE/FB werden die Vorwiderstände entfernt
- In den restlichen Auslesezellen des CBH werden die Vorwiderstände auf $2\,\Omega$ gesetzt

Anhang B

Abkürzungen und Fachbegriffe

σ_{BT}: Rauschpegel eines Großturms

σ_{TC}: Rauschpegel einer Triggerzelle des LAr-Kalorimeters

σ_{Zelle}: Rauschpegel eines Auslesekanals des LAr-Kalorimeters

ADC: engl. analog digital converter - digitalisiert die Signale der Auslese

ADCcts: Skala der ADCs

AGM: engl. analog gating module - elektronische Schaltung, in der die Signalhöhen von Triggertürmen mit eingestellten Schwellenwerten verglichen werden

ANBX: engl. analog box - Gestell, welches 8 Analogkarten enthält

ANCD: engl. analog card - Karte, auf der eine erste Verarbeitung der Signale aus dem LAr-Kalorimeter erfolgt

ANRU: engl. analog receiving unit - Verarbeitet die Signale aus den Analogboxen und leitet sie zu den ADCs weiter

BC: engl. bunch crossing - Zeitpunkt der Kollision der Teilchenpakete im H1-Detektor; die Kollisionen finden alle 96 ns statt

BT: engl. bigtower - größte topologische Einheit des LAr-Triggers, bestehend aus bis zu 4 TTs

BTS: engl. bigtower summing unit - Karte auf der BTs aus bis zu 4 TT-Signalen gebildet werden

CB: engl. central barrel - Oberbegriff für die Kalorimeterräder BBE, CB1, CB2 und CB3

C_D: Kapazität einer Auslesezelle des LAr-Kalorimeters

C_{TC}: Kapazität einer Triggerzelle des LAr-Kalorimeters

CTL: engl. central trigger logic - zentrale Triggerlogik des H1-Detektors

DAC: engl. digital analog converter - elektronische Schaltung, um digitale Signale in analoge umzuwandeln; wird bei H1 als Pulser benutzt

DACcts: Skala der DACs, 1 DACct entspricht 0,742 fC

Datennahme: Zeit, in der mit dem H1-Detektor nach stattgefundenen physikalischen Ereignissen gesucht wird

Datennahmeperiode: Zeitraum innerhalb eines Jahres, in dem Ereignisse im H1-Detektor aufgezeichnet werden

DSP: engl. digital signal processor - Mikroprozessor, über welchen die Datenverarbeitung der Auslese des LAr-Kalorimeters läuft

ENC: engl. equivalent noise charge - auf den Auslesezellen influenzierte Ladung, die ein Signal bewirkt, das der Standardabweichung des durch Rauschen registrierten Signalspektrums entspricht

FADC: engl. flash analog digital converter - schneller Analog-Digital-Konverter im Triggerzweig des LAr-Kalorimeters

FADCcts: Skala der FADCs, 1 FADCct entspricht nominell 125 MeV

FB: engl. forward barrel - Oberbegriff für die Kalorimeterräder FB1 und FB2

FIFO: engl. first in first out - Speicherform, welche das zu erst eingegebene Element auch als erstes freigibt

FE: engl. forward electromagnetic - die Sektion IF1E des LAr-Kalorimeters

FH: engl. forward hadronic - Oberbegriff für die Sektion OF1H und das Rad IF2H/OF2H des LAr-Kalorimeters

Generatoroffset: Ladungsoffset, der ungewollt den Signalen der Pulser beim LAr-Kalorimeter überlagert ist

hintere Ausleseelektronik: Teil der Ausleseelektronik des LAr-Kalorimeters nach der Signalverstärkung auf den Übersetzerkarten

HRC: engl. high resistive coating - Hochwiderstandsbeschichtung der HV-Platten im LAr-Kalorimeter

HV: engl. high voltage - Hochspannung

Jet: Teilchenbündel, welches seine Energie in der Regel weit verstreut deponiert

JFET: engl. junction field effect transistor - Sperrschicht-Feldeffekttransistor

Kalibration: Bestimmung des Zusammenhangs zwischen deponierter Energie in den Auslesezellen und registriertem Signal im LAr-Kalorimeter

kalte Kalibration: Kalibration, bei der die Pulse in Nähe der Auslesezellen im Kryostaten eingespeist werden

Ladungssammlungseffizienz: Anteil der durch Ionisation erzeugten Ladung, die nachgewiesen wird

LAr-Kalorimeter engl. liquid argon - Flüssigargon-Kalorimeter des H1-Experiments

L1-L4 Stufen des H1-Triggersystems, L1 entscheidet über ein Vorbereiten der Auslese, L2 startet die Auslese

Nullpunktsunterdrückung: Schwellenwerte, die bei der Auslese des LAr-Kalorimeters verhindern sollen, daß Zellen ausgelesen werden, die nur Rauschen enthalten

NPU: Abkürzung für Nullpunktsunterdrückung

Pedestal: Ladungssockelwert, der vor der Digitalisierung den Signalen in der Auslese überlagert wird

Pedestaldifferenz: Unterschied zwischen den in der Kalibration bestimmten und den unter Datennahmebedingungen vorherrschenden Pedestals

P_i: Parameter des Polynoms dritten Grades, mit dem die Rekonstruktion von influenzierten Ladungen der Auslesezellen erfolgt

Rauschereignisse: Ereignisse, welche bei zufälliger Auslese des Detektors gefunden werden

Rauschpegel: anderes Wort für ENC

RMS: engl. root mean square - Standardabweichung einer Verteilung

Run: Datensatz von aufgezeichneten Ereignissen

Shaper: elektronische Schaltung, in der das Signal aus den Auslesezellen bipolar geformt wird

S-H-Stufe engl. sample and hold - elektronische Schaltung, um Signalpegel zu einem bestimmten Zeitpunkt festzuhalten

SpaCal: Spagetti-Kalorimeter - rückwärtiges Kalorimeter des H1-Experiments

Steckkapazitäten: Stecker mit aufgelöteten Kapazitäten, die bei den Testmessungen am MPI in München die Kapazitäten der Auslesezellen des LAr-Kalorimeters simulieren

Strahl-Gas-Ereignis: Ereignis durch die Wechselwirkung von Protonen aus dem Teilchenstrahl mit Restgasatomen im Strahlrohr

Strahl-Wand-Ereignis: Ereignis durch den Zusammenstoß von Protonen aus dem Teilchenstrahl mit der Strahlrohrwand

SRV: Signal-Rausch-Verhältnis

SSM: engl. summing and shaping unit - elektronische Schaltung, in der die Signale der Triggerzellen filterverstärkt werden

TC: engl. trigger cell - kleinste Einheit des LAr-Triggers, besteht in hadronischen Sektionen aus 4 Auslesekanälen, in elektromagnetischen aus 16 Auslesekanälen

TMB: engl. trigger merging board - Karte auf der die TC zu TT kombiniert werden

TRICAL: Kalibrationsprogramm zur Bestimmung der Rauschpegel im Triggerzweig

Trigger: Entscheidungseinheit, die festlegt, ob ein Ereignis verarbeitet werden soll oder nicht

Triggerelement: Bit, welches gesetzt wird, wenn eine Detektorkomponente Hinweise auf ein physikalisches Ereignis im Detektor findet

TT: engl. trigger tower - Zusammenfassung von bis zu 6 TCs aus hadronischen und 4 TTs aus elektromagnetischen Sektionen

Upgrade: Teilweise Erneuerung der Ausleseelektronik des LAr-Kalorimeters im Zeitraum zwischen 1995 und 1998

Upgrade-Phase: Zeitlich zusammen erfolgender Block von Erneuerungen in der Ausleseelektronik des LAr-Kalorimeters

warme Kalibration: Kalibration, bei der die Pulse auf der Analogkarte injiziert werden

Literaturverzeichnis

[1] Demokrit, *Fragment 125*, geb. ≈460 v. Chr.

[2] E. Rutherford, *The Scattering of α and β Particles by Matter and the Structure of the Atom*, Phil. Mag 21 (1911) 669

[3] H. Geiger/ E. Marsden, Proc. Roy Soc. 82 (1909) 495

[4] W. Heisenberg, *Über den anschaulichen Inhalt der quantentheoretischen Kinematik und Mechanik*, Zeitschrift für Physik 43 (1927) 172

[5] R. Hofstadter, *Electron Scattering and Nuclear Structure*, Rev. Mod. Phys. 28 (1956) 214

[6] W.K.H. Panofsky, *Electromagnetic Interactions: Low Q^2 Electrodynamics: Elastic and Inelastic Electron (and Muon) Scattering*, 14th Int. Conf. on High Energy Physics, Proceedings, Vienna, 1968, S. 23

[7] H. Fritzsch et al., *Advantages of the Color Octet Gluon Picture*, Phys. Lett. B 47 (1973) 365

[8] S. L. Glashow, *Partial-Symmetries of Weak Interactions*, Nucl. Phys. 22 (1961) 579
S. Weinberg, *A Model of Leptons*, Phys. Rev. Lett. 19 (1967) 1264
A. Salam, *Gauge Unification of Fundamental Forces*, Proc. of the 8th Nobel Symp. (1968)

[9] H1 Collaboration, I. Abt. et al., *The H1 Detector at HERA*, Nucl. Inst. Meth. A 386 (1997) 310

[10] ZEUS Collab., *The ZEUS Detector*, Status Report 1993, DESY, 1993

[11] M. Düren, *The HERMES experiment: From the design to the first results*, Interner Bericht HERMES-95-02, DESY, 1995

[12] HERA-B Collaboration, *An experiment to study CP violation in the B system using an internal target at the HERA storage ring*, DESY-PRC 94/02, 1994

[13] H1-Calorimeter Group, *The H1 liquid argon calorimeter system*, NIM A 336 (1993) 460

[14] M. Fleischer, *Persönliche Mitteilung*

[15] M. Fleischer, *Vortrag über H1-LAr-Kalorimetrie in der ATLAS-Kalorimeter-Gruppe*, 1996

[16] C. Kleinwort et al., *Track Reconstruction in the Iron*, H1-Software Note Nr. 35, DESY, 1992

[17] R.J. Ellison et al., *The H1 Trigger: A Compendium of the Current Scheme for Specialists and Non-Specialists*, H1-Note H1-05/90-137, DESY, 1990

[18] K. Djidi, *DSP Read-Out of ADC's for the H1 Calorimeter*, H1-Note H1-10/90-155, DESY, 1990

[19] J. C. Bizot et al., *Status of Simulation for a Topological L 2 trigger*, H1-Note H1-03/92-212, DESY, 1992

[20] J. C. Bizot et al., *Hardware Study for a Topological L 2 trigger*, H1-Note H1-09/92-240, DESY, 1992

[21] J. Fent et al., *A Level 2 Calorimeter Trigger Using Neuronal Networks*, H1-Note H1-04/91-172, DESY, 1991

[22] C. Grupen, *Teilchendetektoren*, B.I. Wissenschaftsverlag, Mannheim, 1993

[23] P. Rehak, *Proceedings of The Internal School of Physics ,,Enrico Fermi"*, North-Holland Publishing Company, 1983, S. 58

[24] H. Brettel et al., *The first Level Liquid Argon Trigger Technical Realisation*, Internal Report H1-TR-301, DESY, 1987

[25] R. Bernier et al., *H1 Calorimeter Electronics*, H1-Note H1-07/92-237, DESY, 1992

[26] R. Bernard et al., *The ADC board of the H1 calorimeter read-out*, H1-Note H1-10/95-459, DESY, 1995

[27] R. Bernard et al., *MDS, a Service Module for the H1 calorimeter DSP's*, H1-Note H1-10/95-458, DESY, 1995

[28] V. Brisson et al., *Mapping and Adjustment of the Calorimeter Electronic Channels up to ADC's*, H1-Note H1/02/89-104, DESY, 1989

[29] H. Oberlack/P. Ribarics, *Maximal and Minimal Signals in the H1 LAr Calorimeter*, H1-Note H1-Note 89/ 106, 1989

[30] D. Breton et al., *H1 Calorimeter Calibration Electronics*, H1-Note H1-04/92-219, DESY, 1992

[31] C. Pascaud, *Persönliche Mitteilung*

[32] C. Arnault et al., *Correction for missing Cold Calibration generators in the H1 LAr calorimeter*, H1-Note H1-12/91-203, DESY, 1991

[33] C. Pascaud, *Quellcode der Parameteranpassung in der Kalibrationsprozedur für das LAr-Kalorimeter*

[34] P. Hartz et al., *Determination of the Calibration Constant for FB2E from CERN Test Data*, H1-Note H1-09/92-241, DESY, 1992

[35] K. Borras, *Aufbau und Kalibration eines Flüssig-Argon Kalorimeters im H1 Detektor*, Dissertation, Dortmund, 1992

[36] W. Hofmann et al., *Production and Transport of Conducting electrons in a liquid argon ionisation chamber*, NIM 135 (1976) 151

[37] M. Fleischer et al., *Performance and Upgrade of H1 Calorimeters: LAr Calorimeter, SpaCal and VLQ*, Preprint DESY 98-005, DESY, 1998

[38] G. Best, *Bestimmung der Ladungssammlungseffizienz des H1-Flüssigargon-Kalorimeters mit kosmischen Myonen*, Diplomarbeit, Dortmund, 1996

[39] J. Naumann, *Bestimmung der Ladungssammlungseffizienz des H1-Flüssigargon-Kalorimeters mit Myonen*, Diplomarbeit, Dortmund, 1998

[40] H1-Calorimeter Group, *The H1 liquid argon calorimeter system*, NIM A 336 (1993) 493

[41] N. Tobien/ D. Krücker, *Persönliche Mitteilung*

[42] H. Rick, *Persönliche Mitteilung*

[43] J. Fent et al., *Study to noisereduction in H1-Triggerchannels with large towercapacities*, Internal Report MPI-TR-007, MPI für Physik in München, 1995

[44] C. Weddingen/ W. Jüngst, *Elektronik: Einführung für Naturwissenschaftler und Ingenieure*, Springer-Verlag, Berlin, 1986, S. 85

[45] P. Rehak, *Proceedings of The Internal School of Physics ,,Enrico Fermi"*, North-Holland Publishing Company, 1983, S. 28

[46] P. Weinzierl/ M. Drosg, *Lehrbuch der Nuklearelektronik*, Springer-Verlag, Wien/New-York, 1970, S. 263

[47] V. Radeka et al., *Speed and Noise Limits in Ionisation Chamber Calorimeters*, NIM A 265 (1988) 228

[48] P. Manfredi et al., *High Density Monolithic Front-End Systems for Detectors* without *Charge Multiplication*, NIM A 279 (1989) 152

[49] H. J. Köhne, *Persönliche Mitteilung*

[50] R.J. Barlow, *Statistics: A Guide to the Use of Statistical Methods in the Physical Sciences*, John Wiley & Sons, West-Sussex, 1989

[51] F. Descamps et al., *Data Acquisition for the H1 Calorimeters*, H1-Note H1-10/92-256, DESY, 1992

[52] K. Borras, *A Method to Correct the Influence of the Electronic Noise on the Electron Signals for the Liquid Argon Calorimeter in H1*, H1-Note H1-01/93-264, DESY, 1993

[53] A. Babaev et al., *Proposal to Upgrade the LAr Calorimeter and Trigger Electronics*, H1-Note H1-01/96-470, DESY, 1996

[54] W. Pimpl, *Persönliche Mitteilung*

[55] Toshiba Corporation, *JFET 2 SK 372 Datasheet*, Japan

[56] InterFet Corporation, *JFET NJ3600 Databook*, USA

[57] B. Reisert, *Einsatz neuer Vorverstärkerelektronik im Flüssig-Argon-Kalorimeter des H1-Detektors am HERA-Speicherring*, Diplomarbeit, München, 1997

[58] B. Reisert, *Persönliche Mitteilung*

[59] E. Segrè, *Experimental Nuclear Physics, Volume I*, John Wiley & Sons, West-Sussex, 1953

[60] R. M. Sternheimer, *The Density Effect for the Ionisation Loss in Various Materials*, Phys. Rev. 88 (1952) 851

[61] W. Lohmann et al., *Energy Loss of Myons in the Energy Range 1-10000 GeV*, CERN 85-03, 1985

[62] W. R. Leo, *Techniques for Nuclear and Particle Physics Experiments*, Springer Verlag, Berlin, 1994

[63] Particle Data Group, *Review of Particle Properties*, Phys. Lett. B 239 (1990)

[64] E. Segrè, *Nuclei and Particles*, Benjamin, New York, 1965

[65] Particle Data Group, *Particles and Fields*, Phys. Rev. D 50 (1994) 1173

[66] O. C Allkofer et al., *Cosmic Ray Myon Spectrum up to 1 TeV at 75-degrees zenith angle*, Phys. Rev D 19(1979)1368

[67] R. Brun et al., *GEANT User's Guide*, DD/EE/82 edition, 1982

[68] J. Meyer, *Guide for the H1 simulation program H1SIM*, Software-Note 03-11/89, 1989

[69] J. Gayler, *Muon Scale in Data and Monte Carlo using Calibration by Electrons*, Vortrag (16. 1. 1992)

[70] H1 Collaboration, *Observation of Events with an Isolated High Energy Lepton and Missing Transverse Momentum at HERA*, Preprint DESY 98-063, DESY, 1998

Danksagung

An dieser Stelle möchte ich ausdrücklich allen danken, die durch ihre Unterstützung zum Zustandekommen dieser Arbeit beigetragen haben.

Mein besonderer Dank gilt an dieser Stelle Herrn Prof. Dr. D. Wegener, der mir diese interessante und anspruchsvolle Arbeit stellte. Er ermöglichte mir damit, mit großer Selbstständigkeit in der internationalen Gemeinschaft von H1 eine wichtige Aufgabe zu erledigen. Durch sein stetes Hinterfragen von Ergebnissen und seine kritischen Kommentare zeigte er selbst in verfahrenen Situationen die Möglichkeit zum weiteren Vorgehen.

Herrn Prof. Dr. P. Buchholz möchte ich danken, daß er neben all den vielen anderen Arbeiten, die er nun durchzusehen hat, auch noch die meine als Zweitkorrektor übernommen hat.

Ebenso möchte ich Herrn Dr. Manfred Fleischer meinen besonderen Dank dafür aussprechen, daß er trotz der Probleme der großen Entfernung nach Hamburg bereit war, meine Betreuung in dieser Arbeit zu übernehmen. An vielen Stellen gab er durch seine guten Ratschläge entscheidende Anstöße zu dieser Arbeit.

Einen großen Dank an dieser Stelle auch an Herrn Dr. Klaus Wacker und Herrn Dr. Dieter Lüke, die als Systemadministratoren dafür sorgten, daß unsere Computer stets auf bestmöglichem Stand waren. Besonders nach Aufenthalten in Hamburg lernte ich das zu schätzen. Zusätzlich möchte ich mich noch bei Dr. Klaus Wacker für all die helfenden Ratschläge bedanken. Besonders wenn die Statistik einmal wieder zuschlug, wußte er Rat.

Bei Dr. Michael Dirkmann möchte ich mich dafür bedanken, daß er ständig bereit war zu zeigen, wie die Klippen von PAW und anderer Software zu umschiffen sind. Auch für seine stets gute Laune, die immer wieder ermunternd wirkte: Vielen Dank.

R. Pöschl war eine große Hilfe. Besonders bei den Aufenthalten am DESY schuf er stets ein angenehmes Klima im Büro (meistens sogar dann, wenn der BVB verloren hatte). Auch für seine kritische Durchsicht der Arbeit: Vielen Dank.

Ich möchte mich bei Burkard Reisert für seine freundliche Aufnahme am MPI in München und die allzeit gute Zusammenarbeit bedanken.

J. Naumann überließ mir die von ihm für seine Diplomarbeit erzeugten simulierten Datensätze von Halo-Myonen: Vielen Dank.

Ein Dankeschön auch an all die H1-Crews, die zur Mithilfe bereit waren, wenn ich einmal

wieder die Pulser des LAr-Kalorimeters für Messungen benötigte.

Daß die Arbeit zustande kommen konnte, ist sicherlich nicht zuletzt auch ein Verdienst der vielen anderen bei EV, die stets für ein gutes Arbeitsklima sorgten.

Ein besonderer Dank gilt meinen Eltern, die mich durch ihre stete Unterstützung erst ermöglichten diese Arbeit zu beginnen und durchzuführen.

Vor allem möchte ich mich auch bei Jutta bedanken, die mich so manchen Tag nur zum Frühstück zu sehen bekam. Durch ihre Geduld und immerwährende Aufmunterung hat sie mich in allen Phasen der Arbeit so gestärkt, daß es überhaupt möglich wurde, die Arbeit fortzuführen und zu vollenden.

Diese Arbeit wurde mit Mitteln des Bundesministeriums für Bildung, Wissenschaft, Forschung und Technologie unter der Nummer 057 Do 55 P gefördert.