

**Fakultät für Physik und Astronomie**  
**Ruprecht-Karls-Universität Heidelberg**

Staatsexamensarbeit  
im Studienfach Physik

vorgelegt von

**Oliver Niedermaier**

aus Ravensburg

Juli 2000



**Eine absolute  
Energieeichung  
für ein  
Elektronen-  
spektrometer**

Die Staatsexamensarbeit wurde ausgeführt am  
Kirchhoff-Institut für Physik  
unter der Betreuung von  
Herrn Prof. Dr. K. Meier



# Inhaltsverzeichnis

<b>Einleitung</b>	<b>1</b>
<b>1 Der H1-Detektor bei HERA</b>	<b>3</b>
1.1 Der Speicherring HERA . . . . .	3
1.2 Elektron-Proton-Streuung bei HERA . . . . .	4
1.2.1 Kinematik der Elektron-Proton-Streuung . . . . .	4
1.2.2 Kinematische Bereiche der $e$ - $p$ -Streuung . . . . .	8
1.3 Der H1-Detektor . . . . .	8
1.3.1 Die Komponenten des H1-Detektors . . . . .	8
1.3.2 Das Luminositätssystem . . . . .	12
1.3.3 Das Triggersystem bei H1 . . . . .	12
1.4 Das VLQ-Spektrometer . . . . .	13
1.4.1 Physikalische Motivation . . . . .	13
1.4.2 Der Aufbau des VLQ-Spektrometers . . . . .	14
<b>2 Das VLQ-Kalorimeter</b>	<b>21</b>
2.1 Elektromagnetische Kalorimeter . . . . .	21
2.1.1 Schauerausbreitung . . . . .	21
2.1.2 Kalorimeteigenschaften . . . . .	22
2.2 Das VLQ-Kalorimeter . . . . .	24
2.2.1 Prinzipieller Aufbau . . . . .	24
2.2.2 Die aktive Struktur . . . . .	25
2.2.3 Die Ausleseelektronik . . . . .	28
2.2.4 Die Energie- und Ortsrekonstruktion . . . . .	29
2.2.5 Die Energie- und Ortsauflösung . . . . .	31
2.2.6 Der VLQ-Kalorimeter-Trigger . . . . .	33
<b>3 Die Kalibration des VLQ-Kalorimeters</b>	<b>35</b>
3.1 Grundlagen der Kalibration . . . . .	35
3.2 Der kinematische Peak . . . . .	36
3.3 Die Ereignisselektion . . . . .	37
3.3.1 Die Vorselektion . . . . .	37
3.3.2 Die angewandten Schnitte . . . . .	39
3.4 Die Interkalibration der Auslesekanäle . . . . .	40
3.4.1 Methode zur Bestimmung der Kanalfaktoren . . . . .	41

3.4.2	Ergebnis der Kanalfaktorbestimmung . . . . .	47
3.5	Die absolute Kalibration des VLQ-Kalorimeters . . . . .	47
3.5.1	Methode zur Bestimmung der Kalibrationsfaktoren . . . . .	50
3.5.2	Ergebnis der Kalibrationsfaktorbestimmung . . . . .	52
<b>4</b>	<b>Das Ergebnis der Kalibration</b>	<b>55</b>
4.1	Anwendung der Kalibrationskonstanten . . . . .	55
4.1.1	Verteilungen der Cluster-Energie vor und nach der Kalibration	55
4.1.2	Einordnung der ermittelten Energieauflösung . . . . .	57
4.2	Abschätzung zur Güte der Kalibration . . . . .	60
	<b>Zusammenfassung</b>	<b>61</b>

# Einleitung

Die Elementarteilchenphysik befaßt sich mit der Suche nach den fundamentalen Bausteinen der Materie und der Erforschung der Wechselwirkungen zwischen diesen Teilchen. Um die kleinsten Strukturen der Materie zu untersuchen, werden Teilchen sehr hoher Energie benötigt. Mit steigender Energie und damit verbundener kleinerer Wellenlänge der Teilchen lassen sich immer kleinere Strukturen auflösen. Die hochenergetischen Teilchenstrahlen werden dabei von Teilchenbeschleunigern zur Verfügung gestellt.

Am Forschungszentrum DESY (**D**eutsches **E**lektronen-**S**ynchrotron) in Hamburg ist eine Beschleunigeranlage, die Teilchenstrahlen sehr großer Energie liefert, in Betrieb. Mit Hilfe der Speicherringanlage HERA (**H**adron-**E**lektron-**R**ing-**A**nlage) werden seit 1991 Wechselwirkungen zwischen Elektronen und Protonen untersucht. Dabei werden Elektronen, die eine Energie von 27.56 GeV haben, frontal mit Protonen, deren Energie 920 GeV beträgt, zur Kollision gebracht. An den Kollisionspunkten befinden sich Detektoren, mit deren Hilfe die Elektron-Proton-Wechselwirkungen untersucht werden.

Der H1-Detektor, der sich an einem der Wechselwirkungspunkte befindet, hat die Aufgabe, die bei der Elektron-Proton-Streuung entstehenden Teilchen nachzuweisen, sie zu identifizieren und ihre Energie zu messen. Der H1-Detektor stellt dabei ein komplexes System von einzelnen Detektoren dar, die alle spezifische Meßaufgaben erfüllen. Das Ziel des H1-Experimentes ist es, die innere Struktur des Protons zu erforschen.

Eine der Komponenten des H1-Detektors ist das VLQ-Spektrometer (**V**ery **L**ow **Q**<sup>2</sup>). Es hat die Aufgabe, den Bereich bei kleinen Werten der kinematischen Variablen  $Q^2$  zu untersuchen. Die Variable  $Q^2$  stellt dabei das negative Quadrat des Viererimpulsübertrages des Elektrons auf das Proton dar. Bei kleinen  $Q^2$ -Werten werden die Elektronen unter sehr kleinen Ablenkwinkeln gestreut; ihre Flugrichtung ändert sich kaum. Das VLQ-Spektrometer besteht aus vier Komponenten: einem Spurdetektor, einem elektromagnetischen Kalorimeter, einem Detektor zur Flugzeitmessung und einem Fahrmechanismus. Dabei hat das Kalorimeter die Aufgabe, die Energie und den Auftreffpunkt der gestreuten Elektronen zu bestimmen.

In dieser Arbeit wird die Kalibration des VLQ-Kalorimeters beschrieben, die mit Hilfe des kinematischen Peaks durchgeführt wird.





# Kapitel 1

## Der H1-Detektor bei HERA

### 1.1 Der Speicherring HERA

Am Deutschen Elektronen-Synchrotron (DESY) in Hamburg befindet sich seit 1991 die Speicherringanlage HERA (Hadron-Elektron-Ring-Anlage) in Betrieb. Einen Überblick über den Speicherring zeigt die Abbildung 1.1. HERA [1] besteht aus

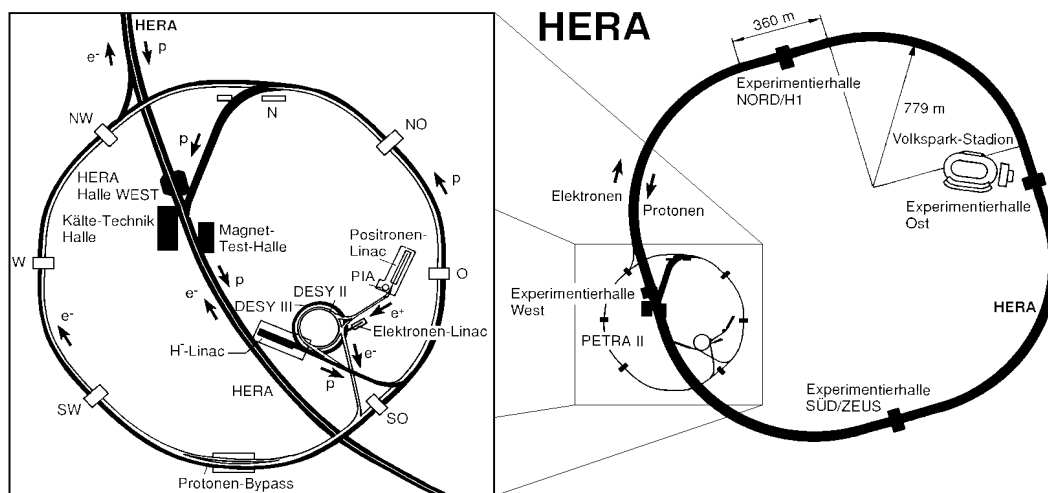


Abbildung 1.1: Überblick über den Speicherring HERA mit den vier Experimentierhallen und den Vorbeschleunigern, die den Speicherring mit Elektronen bzw. Positronen und Protonen versorgen.

zwei separaten Speicherringen, in denen Elektronen bzw. Positronen und Protonen in entgegengesetzter Richtung laufen. Die beiden Speicherringe befinden sich in ca. 1 m Abstand parallel übereinander und haben einen Umfang von 6.3 km, wobei der Protonenspeicherring mit supraleitenden, der Elektronen/Positronen-Speicherring dagegen mit normalleitenden Magneten ausgestattet ist. Um die Elektronen bzw.

Positronen<sup>1</sup> und die Protonen auf ihre Endenergien von 27.56 GeV bzw. 920 GeV zu beschleunigen, müssen die Teilchen eine Kette von Vorbeschleunigern durchlaufen, die in Abbildung 1.1 vergrößert dargestellt sind. Die beiden Teilchenstrahlen werden an vier Punkten zur Kollision gebracht, an denen dann Elektron-Proton-Wechselwirkungen zu beobachten sind. An zwei dieser vier Wechselwirkungspunkte sind die Experimente H1 und ZEUS in Betrieb, deren Ziel es ist, die Struktur des Protons in einem neuen kinematischen Bereich zu erforschen, der erst durch HERA erschlossen wurde.

Die weiteren Experimente, die bei HERA an den beiden anderen Wechselwirkungspunkten durchgeführt werden, sind HERMES und HERA-B, wobei dort mit ruhenden Targets gearbeitet wird. Bei HERMES wird mit Hilfe des Elektronenstrahls die Spinstruktur des Protons untersucht, wohingegen der Protonenstrahl bei HERA-B dazu verwendet wird, die CP-Verletzung im System der B-Mesonen nachzuweisen.

Die Teilchenstrahlen, die sich in den beiden Speicherringen befinden, sind nicht kontinuierlich, sondern haben eine räumliche und zeitliche Struktur. In jedem Ring befinden sich 175 Teilchenpakete ("Bunches") von jeweils  $10^{10}$  -  $10^{11}$  Teilchen, die in einem zeitlichen Abstand von 96 ns aufeinandertreffen. Nachdem alle 175 Pakete durch einen Wechselwirkungspunkt gelaufen sind, wird eine Strahlpause von ca.  $4 \mu\text{s}$  eingelegt. Danach erst erreicht das erste der 175 Teilchenpakete wieder den Wechselwirkungspunkt. Diese Strahlpause dient dazu, gegebenenfalls die Ablenkspannung hochzufahren, falls der Protonenstrahl aus der Anlage genommen werden soll. Auf diese Weise wird einem unkontrollierten Verlassen des Protonstrahls und somit möglichen technischen Schäden vorgebeugt. In jedem der beiden Speicherringe gibt es auch Teilchenpakete, die keine Kollisionspartner haben. Diese werden "Pilot-Bunches" genannt und dienen dazu, die Rate von Untergrundereignissen, die durch Strahl-Gas-Wechselwirkungen und Strahl-Strahlrohr-Wechselwirkungen zustande kommen, abzuschätzen.

## 1.2 Elektron-Proton-Streuung bei HERA

### 1.2.1 Kinematik der Elektron-Proton-Streuung

Die vom Speicherring HERA zur Verfügung gestellten Elektronen und Protonen werden in der Mitte des H1-Detektors frontal zur Kollision gebracht. Dabei beträgt die Elektronenenergie  $E_e = 27.56$  GeV und die Protonenenergie  $E_p = 920$  GeV. Daraus ergibt sich eine Schwerpunktsenergie  $\sqrt{s}$ , die näherungsweise

$$\sqrt{s} \approx \sqrt{4 \cdot E_e \cdot E_p} \approx 318.5 \text{ GeV} \quad (1.1)$$

beträgt. Diese Energie steht maximal zur Erzeugung neuer Teilchen zur Verfügung. Die Elektron-Proton-Kollision führt zur Erzeugung eines gestreuten Leptons  $l$  und

---

<sup>1</sup>Das Wort Elektron wird im folgenden für Elektronen und Positronen verwendet.

eines hadronischen Endzustandes  $X$ . Abbildung 1.2 zeigt eine schematische Darstellung des Streuprozesses

$$e + p \rightarrow l + X. \quad (1.2)$$

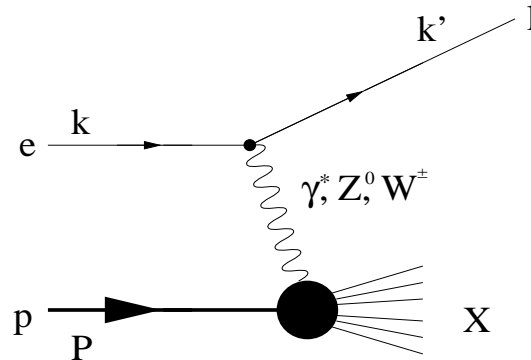


Abbildung 1.2: Schematische Darstellung der Elektron-Proton-Streuung.

Ziel der Elektron-Proton-Streuung bei HERA ist es, die innere Struktur der Materie zu erklären. Dazu muß die Kinematik des gestreuten Leptons und des hadronischen Endzustandes analysiert werden.

Die Elektronen und Protonen können über den Austausch verschiedener Teilchen miteinander wechselwirken. Beim Austausch eines geladenen  $W^\pm$ - bzw.  $W^\pm$ -Bosons, bei denen ein Neutrino bzw. Antineutrino entsteht, spricht man von einer Wechselwirkung mit *geladenen Strömen*. Findet dagegen ein Austausch eines Photons oder  $Z^0$ -Teilchens statt, so handelt es sich um eine Wechselwirkung mit *neutralen Strömen*. Da die auslaufenden Neutrinos im Detektor nicht nachgewiesen werden können, muß die Kinematik des Streuprozesses aus dem hadronischen Endzustand rekonstruiert werden. Hierfür müssen im Prinzip alle Teilchen des hadronischen Endzustandes sowie deren Viererimpulse bekannt sein. Bei der Wechselwirkung mit neutralen Strömen gibt es im Falle eines Photonaustausches immer ein gestreutes Elektron. Dieses kann im Detektor nachgewiesen werden, falls es im Akzeptanzbereich des Detektors liegt. In diesem Fall reicht die Energiemessung dieses Elektrons aus, um die Kinematik der Streuung vollständig zu beschreiben. Da das in dieser Arbeit betrachtete VLQ-Kalorimeter die Aufgabe hat, dieses gestreute Elektron nachzuweisen, werden im folgenden durch Photonaustausch vermittelte Elektron-Proton-Wechselwirkungen betrachtet.

Zur Beschreibung der Kinematik der Elektron-Proton-Streuung werden Vierervektoren verwendet, da das Skalarprodukt zweier Vierervektoren lorentz-invariant ist. Eine ausführliche Diskussion der Kinematik findet sich z.B. in [2]. Nach den Erhaltungssätzen für Energie und Impuls muß die Summe der Viererimpulse vor und nach der Reaktion gleich sein:

$$k + P = k' + X. \quad (1.3)$$

In dieser Gleichung sind  $k$  bzw.  $k'$  die Viererimpulse des ein- bzw. auslaufenden Elektrons,  $P$  der Viererimpuls des einlaufenden Protons und  $X$  der Viererimpuls des hadronischen Endzustandes. Alle aufgeführten Vierervektoren sind im Laborsystem angegeben. In die Berechnung der invarianten Masse  $W$  des hadronischen Endzustandes, die durch die Größe  $W^2 = X^2$  definiert ist, geht die Ruhemasse  $M$  des Protons und die Größe  $q$  mit

$$q = k - k', \quad q^2 = (k - k')^2 < 0 \quad (1.4)$$

ein. Die Größe  $q$  stellt den Viererimpulsübertrag des Elektrons auf das Proton dar. Mit Gleichung 1.3 folgt:

$$W^2 = X^2 = (q + P)^2 = q^2 + 2qP + M^2. \quad (1.5)$$

Die invariante Masse  $W$  des hadronischen Systems ist somit gleichbedeutend mit der Schwerpunktsenergie des Photon-Proton-Systems  $\sqrt{s_{\gamma p}}$ , für die gilt:

$$\sqrt{s_{\gamma p}} = \sqrt{(q + P)^2}. \quad (1.6)$$

Die Beschreibung der Kinematik der Elektron-Proton-Streuung erfolgt meistens mit Hilfe der drei folgenden Variablen:

- **Quadrat des Viererimpulsübertrages**

$$Q^2 = -q^2, \quad (1.7)$$

- **Bjorkensche Skalenvariable**

$$x = \frac{Q^2}{2qP}, \quad (1.8)$$

- **Inelastizität**

$$y = \frac{qP}{kP}. \quad (1.9)$$

Diese drei Größen haben auch eine anschauliche physikalische Bedeutung: Die Variable  $Q^2$  ist das negative Quadrat des Viererimpulses des ausgetauschten Photons, die Bjorkensche Skalenvariable  $x$  gibt im naiven Parton-Modell den longitudinalen Impulsbruchteil des gestreuten Quarks am Gesamtprotonimpuls an. Die Inelastizität  $y$  gibt den Bruchteil des Energieübertrages vom Elektron auf das Proton im Protonruhesystem an. Die vier Größen  $s$ ,  $Q^2$ ,  $x$  und  $y$  stehen miteinander in Beziehung durch

$$Q^2 = xys. \quad (1.10)$$

Bei festem  $s$ , das durch

$$s = (k + P)^2 \quad (1.11)$$

gegeben ist, sind nur zwei der drei oben genannten Größen unabhängig voneinander. Die beiden kinematischen Variablen  $Q^2$  und  $x$  lassen sich aus der Energie  $E'_e$  und dem

im Laborsystem gemessenen Ablenkwinkel  $\vartheta_e$  des gestreuten Elektrons berechnen. Dieser Winkel  $\vartheta_e$  ist definiert als Winkel zwischen der Protonflugrichtung und der Flugrichtung des gestreuten Elektrons. Werden die Ruhemassen vernachlässigt, so erhält man:

$$Q^2 = 4E_e E'_e \cos^2 \frac{\vartheta_e}{2} \quad (1.12)$$

und

$$x = \frac{E'_e \cos^2 \frac{\vartheta_e}{2}}{E_P \left(1 - \frac{E'_e}{E_e} \sin^2 \frac{\vartheta_e}{2}\right)}. \quad (1.13)$$

Daraus ergibt sich für die Inelastizität  $y$

$$y = 1 - \frac{E'_e}{E_e} \sin^2 \frac{\vartheta_e}{2}. \quad (1.14)$$

Abbildung 1.3 zeigt die Abhängigkeit dieser Variablen voneinander, wobei die hier dargestellte kinematische Ebene von den Variablen  $Q^2$  und  $x$  aufgespannt wird. Dabei läßt sich jedes Ereignis als Punkt in dieser Ebene charakterisieren. Die Diagonale in dieser Abbildung stellt die Gerade  $y = 1$  dar. Aus dieser Abbildung wird ersicht-

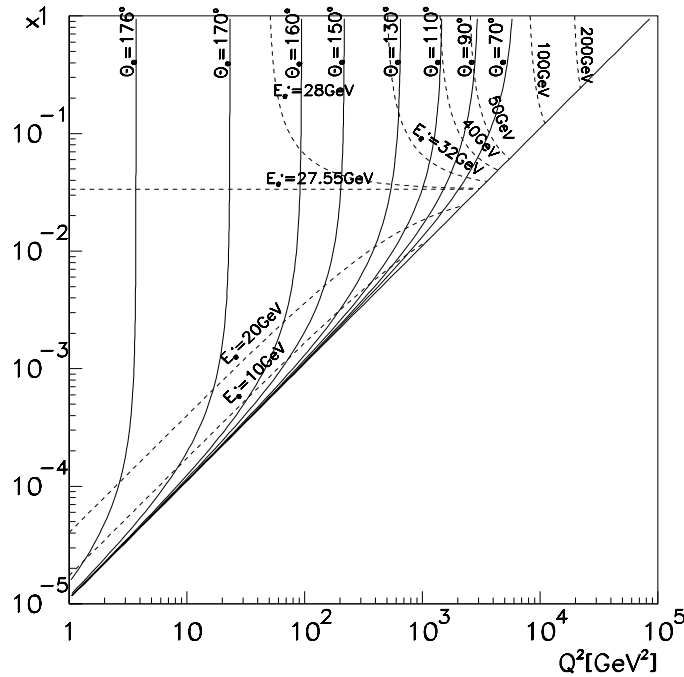


Abbildung 1.3: Die Abbildung zeigt die Linien konstanter Energien (gestrichelt) und Ablenkwinkel (durchgezogen) des gestreuten Elektrons in Abhängigkeit von  $Q^2$  und  $x$ .

lich, daß sich die Kinematik der Elektron-Proton-Streuung vollständig durch die Messung des Ablenkwinkels und der Energie des gestreuten Elektrons bestimmen läßt.

## 1.2.2 Kinematische Bereiche der $e$ - $p$ -Streuung

In der Elektron-Proton-Streuung bei HERA gibt es zwei kinematische Bereiche, zwischen denen unterschieden wird. Dabei dient die Variable  $Q^2$ , die das negative Quadrat des Impulsübertrages des Elektrons auf das Proton darstellt, dazu, ein Ereignis in einen der beiden Bereiche einzuordnen. Bei kleinen ( $Q^2 \ll 1 \text{ GeV}^2$ ) Impulsüberträgen bis hin zu  $Q^2 \approx 0 \text{ GeV}^2$  spricht man von Photoproduktionsergebnissen. Der Name Photoproduktion ergibt sich aus der Tatsache, daß das ausgetauschte Photon bei kleinen Impulsüberträgen  $Q^2$  beinahe reell ist. Bei großen Impulsüberträgen, die im Bereich  $Q^2 \geq 1 \text{ GeV}^2$  liegen, spricht man von tief inelastischer Streuung (DIS, **D**eep **I**nelastic **S**cattering). Diese Bezeichnung rührt daher, daß die ausgetauschten, virtuellen Photonen einen hohen Impuls auf das Proton übertragen und direkt mit einem Quark des Protons wechselwirken. Dabei wird aus dem Proton ein Quark herausgestreut; somit gibt es zwei getrennte hadronische Systeme.

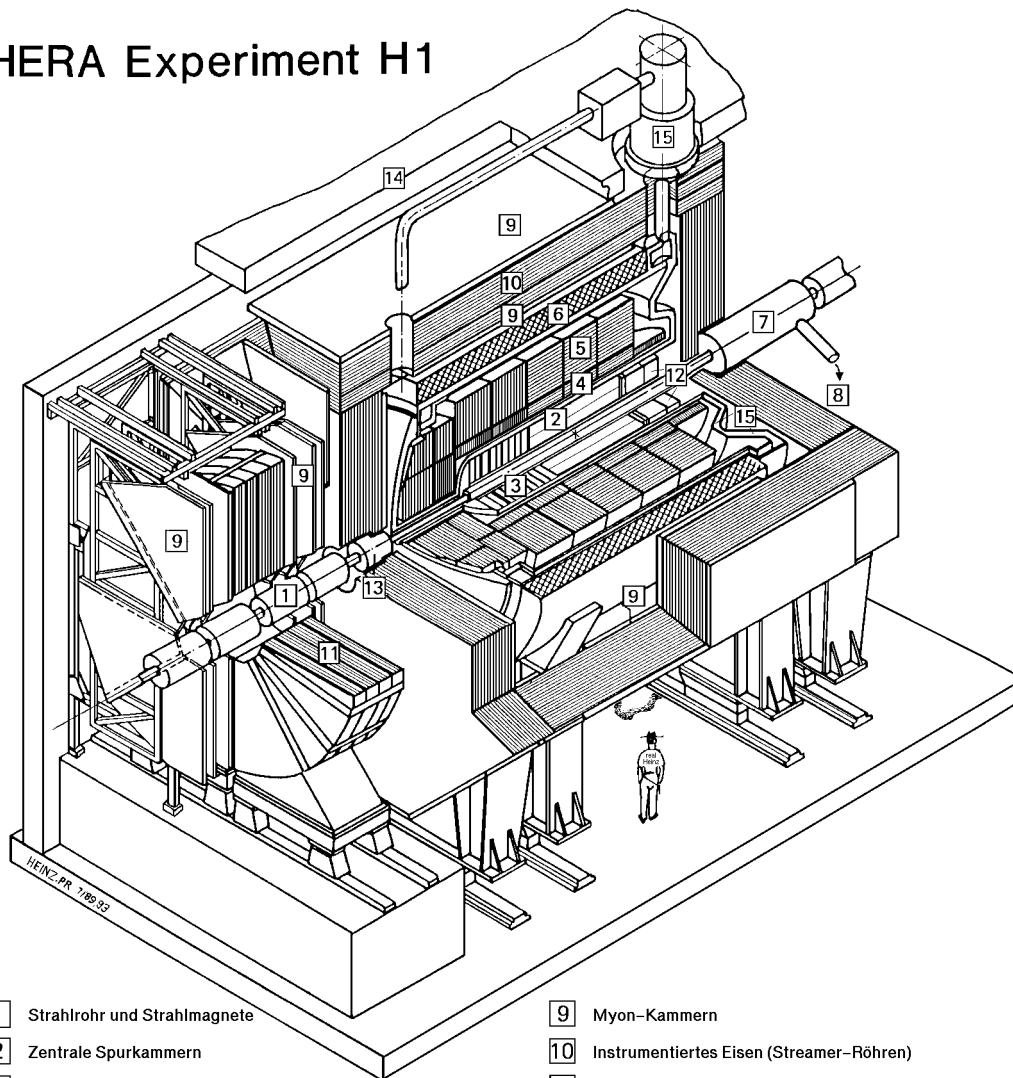
## 1.3 Der H1-Detektor

Der H1-Detektor [3] steht in der Experimentierhalle Nord des HERA-Speicherrings. Abbildung 1.4 zeigt einen Querschnitt des Detektors, der fast den ganzen Raumwinkelbereich von  $4\pi$  abdeckt. Im Zentrum des Detektors kollidieren Elektronen und Protonen, die von HERA zur Verfügung gestellt werden. Der Detektor hat die Aufgabe, möglichst viele der bei diesen Kollisionen entstehenden Teilchen nachzuweisen und ihre Viererimpulse zu bestimmen, wobei die klare Identifizierung und die Energiemessung der gestreuten Elektronen sowie die Messung des hadronischen Endzustandes im Vordergrund steht. In Abbildung 1.4 kommen Protonen, die eine Energie von 920 GeV haben, von rechts, und kollidieren im Zentrum des Detektors mit von der linken Seite kommenden Elektronen, die eine Energie von 27.56 GeV besitzen. Das H1-Koordinatensystem ist wie folgt gewählt: die  $+z$ -Achse ist mit der Protonflugrichtung identisch, sie wird als Vorwärtsrichtung bezeichnet. Die  $+x$ -Richtung ist horizontal orientiert und zeigt in die Mitte des Speicherrings HERA (in Abbildung 1.4 also nach vorne). Schließlich zeigt die  $+y$ -Richtung des H1-Koordinatensystem nach oben. Da die Protonenenergie viel größer ist als die der Elektronen und sich somit der Schwerpunkt des Elektron-Proton-Systems in Protonflugrichtung bewegt, ist auch der Teilchen- und Energiefluß hauptsächlich in diese Richtung konzentriert. Deshalb ist der Detektor in Vorwärtsrichtung deutlich massiver gebaut als in Rückwärtsrichtung. Diese Asymmetrie ist in Abbildung 1.4 deutlich sichtbar. Der H1-Detektor ist ein komplexes System aus vielen Einzeldetektoren mit unterschiedlichen Aufgaben.

### 1.3.1 Die Komponenten des H1-Detektors

Im folgenden werden die einzelnen Komponenten des Detektors und ihre spezifischen Aufgaben kurz erklärt, wobei sich die Nummern im Text auf Abbildung 1.4 beziehen.

## HERA Experiment H1



- |                 |  |    |  |
|-----------------|--|----|--|
| 1               | Strahlrohr und Strahlmagnete                     | 9  | Myon-Kammern                             |
| 2               | Zentrale Spurkammern                             | 10 | Instrumentiertes Eisen (Streamer-Röhren) |
| 3               | Vorwärtsspurkammern und Übergangstrahlungsmodule | 11 | Myon-Toroid-Magnet                       |
| 4               | Elektromagnetisches Kalorimeter (Blei)           | 12 | warmes elektromagnetisches Kalorimeter   |
| 5               | Hadronisches Kalorimeter (Edelstahl)             | 13 | Vorwärts-Kalorimeter                     |
| } Flüssig-Argon |  | 14 | Betonabschirmung                         |
| 6               | Supraleitende Spule (1.2T)                       | 15 | Flüssig-Argon-Kryostat                   |
| 7               | Kompensationsmagnet                              |    |  |
| 8               | Helium-Kälteanlage                               |    |  |

Abbildung 1.4: Der H1-Detektor im Querschnitt.

## Die Spurrkammern

Die Spurrkammern (2,3) dienen dem Nachweis und der Impulsmessung geladener Teilchen, wobei der Impuls aus der Krümmung der Teilchenspur im Magnetfeld bestimmt wird. Die Spuren dienen zur Bestimmung des Wechselwirkungspunktes (*Vertex*). Die Identifikation der Teilchen erfolgt mit Hilfe ihres spezifischen Energieverlustes  $dE/dx$ . Wegen der unterschiedlichen Energien der kollidierenden Protonen und Elektronen werden viele geladene Teilchen unter kleinen Winkeln  $\vartheta$  zur Protonenflugrichtung produziert. Deshalb ist das Spurrkammersystem in eine zentrale Region (2) und eine Vorwärtsregion (3) unterteilt. Diese Spurrkammern sind sehr nahe an der Strahlröhre (1) und somit auch am Vertex angeordnet, um eine Streuung der Teilchen an Materie und eine damit verbundene Änderung der ursprünglichen Teilchenflugrichtung zu vermeiden. Mit diesem Spurrkammersystem können die Winkel  $\vartheta$  und die Impulse  $p$  geladener Teilchen mit einer Präzision von  $\sigma_\vartheta \approx 1$  mrad und  $\sigma_p/p \approx 3 \cdot 10^{-3} \text{GeV}^{-1} \cdot p$  gemessen werden.

## Die elektromagnetischen Kalorimeter

Die elektromagnetischen Kalorimeter (4,12), die zur Energiemessung von Elektronen und Photonen dienen, schließen sich nach außen unmittelbar an die Spurrkammern an. Dabei deckt das Flüssig-Argon-Kalorimeter, das aus einem elektromagnetischen (4) und einem hadronischen (5) Teil besteht, den Zentral- und Vorwärtsbereich ab. Beide Teile dieses Kalorimeters befinden sich in flüssigem Argon, das von einem Flüssig-Argon-Kryostaten (15) auf eine Temperatur von  $-183^\circ$  Celsius abgekühlt wird. Der elektromagnetische Teil besteht hierbei aus Bleiplatten als Absorber und flüssigem Argon als aktivem Medium. Durch Ionisation werden im flüssigen Argon Ladungen freigesetzt, die durch ein angelegtes elektrisches Feld an die Elektroden transportiert und dort ausgelesen werden. Durch die Segmentierung der Elektroden wird eine Auslese mit einer sehr feinen Granularität erreicht. Die Dicke des elektromagnetischen Teiles des Flüssig-Argon-Kalorimeters variiert zwischen 20 und 30 Strahlungslängen, wobei die Strahlungslänge für das Absorbermaterial Blei 5.6 mm beträgt. Die relative Energieauflösung des elektromagnetischen Flüssig-Argon-Kalorimeters beträgt  $\sigma(E)/E = 11\%/\sqrt{E/\text{GeV}} \oplus 1\%$ <sup>2</sup>. Der Rückwärtsbereich wird vom elektromagnetischen Teil eines Blei-Szintillator-Faser-Kalorimeters, dem sogenannten "Spaghettikalorimeter" Spacal (12), abgedeckt. Dieses Kalorimeter besteht aus Bleiplatten, in denen Szintillatorfasern eingebettet sind, die mit Photomultipliern ausgelesen werden. Die relative Energieauflösung dieses Kalorimeters beträgt  $\sigma(E)/E = 7.1\%/\sqrt{E/\text{GeV}} \oplus 1\%$ .

## Die hadronischen Kalorimeter

Die hadronischen Kalorimeter (5,12) haben die Aufgabe, die Energie der Hadronen zu messen. Da die hadronische Absorptionslänge  $\lambda$  viel größer ist als die Strahlungslänge  $X_0$ , sind die hadronischen Kalorimeter (5,12) direkt im Anschluß an die

---

<sup>2</sup>Das Zeichen  $\oplus$  bedeutet, daß die beiden Terme quadratisch zu addieren sind:  $a \oplus b = \sqrt{a^2 + b^2}$ .



elektromagnetischen (von der Strahlröhre aus gesehen weiter außen) angeordnet. Für Eisen beträgt die Wechselwirkungslänge  $\lambda = 16.7$  cm, die elektromagnetische Strahlungslänge  $X_0$  dagegen nur 1.75 cm. Die elektromagnetischen Kalorimeter absorbieren deshalb die Energie der Elektronen und Photonen fast vollständig, wohingegen die Hadronen erst im hadronischen Kalorimeterteil mit genügender Genauigkeit gemessen werden. Im extremen Vorwärtsbereich befindet sich das sogenannte Plug-Kalorimeter (13), ein Kupfer-Silizium-Kalorimeter. Der Vorwärts- und Zentralbereich wird von dem hadronischen Teil des Flüssig-Argon-Kalorimeters (5) abgedeckt. Wie auch beim elektromagnetischen Teil besteht das aktive Material hier aus flüssigem Argon, als Absorber dienen Edelstahlplatten. Die Dicke des hadronischen Teils des Flüssig-Argon-Kalorimeters variiert zwischen 4.5 und 8 hadronischen Absorptionslängen. Die Auslesestruktur des hadronischen Teils ist im Vergleich zum oben beschriebenen elektromagnetischen Teil des Flüssig-Argon-Kalorimeters etwas gröber. Die relative Energieauflösung beträgt im hadronischen Teil  $\sigma(E)/E = 50\%/\sqrt{E/\text{GeV}} \oplus 2\%$ . Der Rückwärtsbereich wird von einem hadronischen Spacal (12) abgedeckt, das einen ähnlichen Aufbau wie der elektromagnetische Teil des Spacals aufweist.

### Die Magnetspule und das instrumentierte Eisen

Die oben beschriebenen Spurkammern und Kalorimeter werden im Zentralbereich von einer supraleitenden Magnetspule (6) umgeben. Die Spule, die durch flüssiges Helium auf eine Temperatur von 4 K gekühlt wird, erzeugt innerhalb des Detektors ein homogenes Magnetfeld von 1.2 T. Mit diesem Magnetfeld und den bereits beschriebenen Spurkammern ist es möglich, aus der Krümmung der gemessenen Teilchenspuren den Impuls und das Ladungsvorzeichen der Teilchen zu bestimmen. Der Zentraldetektor ist von einem 2000 t schweren Eisenjoch (10) umgeben. Es dient als Rückflußjoch für das im Detektor vorhandene Magnetfeld. Mit den im Eisen liegenden Streamer-Röhren ist es möglich, aus dem Detektor entweichende Myonen nachzuweisen. Außerdem können hiermit hadronische Schauer, die nicht vollständig in den hadronischen Kalorimetern absorbiert wurden, analysiert werden.

### Weitere Detektoren

Im extremen Vorwärtsbereich des H1-Detektors befindet sich ein Detektor zum Nachweis von Protonen (FPS) und ein Detektor zum Nachweis von Neutronen (FNC). Im Vorwärtsbereich ist ein Myonspektrometer angebracht, das aus Myonkammern (9) und einem Myon-Toroid-Magneten (11) besteht. In den Myonkammern können die Spuren der aus dem Detektor entweichenden Myonen nachgewiesen werden. Die Betonabschirmung (14), die den ganzen Detektor umgibt, hat die Aufgabe, die Umgebung des Detektors gegen Strahlung aus dem Experimentierbereich abzuschirmen.

### 1.3.2 Das Luminositätssystem

Die Luminosität  $\mathcal{L}$  ist eine charakteristische Größe für einen Beschleuniger. Sie gibt den Zusammenhang zwischen dem Wirkungsquerschnitt  $\sigma$  eines bestimmten Prozesses und der Wechselwirkungsrate  $\dot{N}$  an:

$$\dot{N} = \mathcal{L}\sigma. \quad (1.15)$$

Die Luminosität  $\mathcal{L}$  kann also bestimmt werden, indem man die Rate  $\dot{N}$  eines Prozesses mißt, dessen Wirkungsquerschnitt  $\sigma$  bekannt ist. Am Speicherring HERA wird zur Bestimmung der Luminosität die Rate von sogenannten Bethe-Heitler-Ereignissen (Bremsstrahlung) gemessen. Darunter versteht man den Prozeß

$$e + p \rightarrow e + \gamma + p, \quad (1.16)$$

dessen Wirkungsquerschnitt sich innerhalb der Quantenelektrodynamik (*QED*) mit hoher Präzision berechnen läßt. Die Detektoren, die bei HERA zur Luminositätsmessung verwendet werden, befinden sich beide im rückwärtigen Bereich. An der Position  $z = -33$  m befindet sich ein Kleinwinkel-Elektron-Kalorimeter (*Electron-Tagger*), bei  $z = -102.9$  m ist ein Photondetektor (*Photon-Tagger*) für die Photonen aus dem Bethe-Heitler-Prozeß angebracht.

### 1.3.3 Das Triggersystem bei H1

Der Trigger<sup>3</sup> ist ein System, das die Aufgabe hat, die physikalisch interessanten Ereignisse aus den Elektron-Proton-Wechselwirkungen von den Untergrundereignissen zu trennen. Untergrundereignisse entstehen unter anderem durch Wechselwirkungen zwischen Protonen und Atomen des Restgases im Strahlrohr, durch Synchrotronstrahlung des Elektronenstrahls und durch vereinzelte Protonen, die Teilchenschauer verursachen, weil sie die Strahlröhre und andere Materialien des Detektors treffen. Um nun aus der Flut von Signalen, die von der großen Zahl der Detektorkanäle registriert werden, nur die Signale der wirklich interessanten Ereignisse auszulesen, wird bei H1 ein System verwendet, das mit mehreren Triggerstufen arbeitet. Die einzelnen Triggerstufen werden im folgenden kurz beschrieben:

**Level1-Trigger (L1):** Hier werden alle Signale der einzelnen Subdetektoren registriert. Diese werden dabei zu sogenannten Subtriggern zusammengefaßt. Da eine Zeitspanne von etwa  $2.3 \mu s$  benötigt wird, um zu entscheiden, ob der Detektor ausgelesen wird oder nicht, werden die registrierten Signale in Schieberegister (*Pipelines*) geschrieben. Auf diese Weise können die Daten mehrerer Ereignisse gespeichert werden. Somit arbeitet L1 "totzeitfrei", d.h. der Detektor verliert keine Ereignisse. Sobald einer der Subtrigger auslöst, wird die Pipeline angehalten und ein Signal zum Auslesen des Detektors gegeben.

**Level2-Trigger (L2):** Hier werden die Ereignisse, die mit Hilfe der ersten Triggerstufe ausgelesen wurden, auf ihre physikalische Relevanz untersucht. Die

---

<sup>3</sup>trigger (engl.): Auslöser

Entscheidungszeit hierfür beträgt  $20 \mu s$ . Wird das analysierte Ereignis verworfen, so wird der Detektor wieder für die Datennahme bereit gemacht.

**Level3-Trigger (L3):** Der Level3-Trigger benötigt  $800 \mu s$  für die Entscheidung, ob das Ereignis verworfen wird oder die nächsten Triggerstufen durchläuft. Diese Triggerstufe wird zur Zeit nicht verwendet.

**Level4-Trigger (L4):** Hier stehen die gesamten Informationen des H1-Detektors zur Verfügung. Die Triggerstufe L4 besteht aus mehreren parallelgeschalteten, asynchron arbeitenden Computern.

**Level5-Trigger (L5):** Falls das Ereignis die L4-Triggerstufe passiert, wird es vollständig rekonstruiert, entsprechend seiner physikalischen Natur in eine bestimmte Ereignisklasse eingeteilt und abgespeichert.

## 1.4 Das VLQ-Spektrometer

### 1.4.1 Physikalische Motivation

Die physikalische Motivation für den Bau des VLQ<sup>4</sup>-Spektrometers wird ersichtlich, wenn man den Photon-Absorptionsprozeß

$$\gamma^* + p \rightarrow X \quad (1.17)$$

in der inelastischen Elektron-Proton-Streuung betrachtet. Der Photonabsorptionswirkungsquerschnitt hängt bei einer gegebenen Schwerpunktsenergie  $\sqrt{s}$  des e-p-Systems von der Schwerpunktsenergie  $\sqrt{s_{\gamma p}}$  des Photon-Proton-Systems, die der invarianten Masse  $W$  des hadronischen Systems  $X$  entspricht, und von  $Q^2$ , dem negativen Quadrat des Viererimpulses des ausgetauschten virtuellen Photons  $\gamma^*$ , ab.

Abbildung 1.5 zeigt diesen vom H1-Detektor gemessenen Photon-Proton-Wirkungsquerschnitt als Funktion von  $Q^2$  mit der invarianten Masse  $W$  als Parameter. Aus dieser Abbildung ist klar ersichtlich, daß die gemessenen Wirkungsquerschnitte bei Werten von  $Q^2 \approx 1 \text{ GeV}^2$  enden. Die Meßwerte bei  $Q^2 < 0.01 \text{ GeV}^2$  wurden mit Hilfe des Electron-Taggers bestimmt, der sich im rückwärtigen Bereich des H1-Detektors bei  $z = -33 \text{ m}$  befindet. In diesem Electron-Tagger werden Elektronen nachgewiesen, die unter sehr großen Winkeln  $\vartheta_e$  gestreut werden (Photoproduktionsereignisse). Der kinematische Bereich zwischen  $0.01 \text{ GeV}^2$  und  $1 \text{ GeV}^2$  ist, wie in Abbildung 1.5 klar zu erkennen ist, noch nicht abgedeckt. Abbildung 1.6 zeigt die verschiedenen Akzeptanzbereiche der vorhandenen H1-Subdetektoren in der  $y$ - $Q^2$ -Ebene. Die Region von  $10^5 \text{ GeV}^2$  bis zu  $10^2 \text{ GeV}^2$  wird vom Flüssig-Argon-Kalorimeter abgedeckt; das Spacal mißt im  $Q^2$ -Bereich zwischen  $10^2 \text{ GeV}^2$  und  $1 \text{ GeV}^2$ . Den Bereich der kinematischen Variablen  $Q^2$  zwischen  $0.02 \text{ GeV}^2$  und  $1 \text{ GeV}^2$  konnte bis zum Frühjahr 1998 keiner der vorhandenen H1-Detektoren abdecken.

---

<sup>4</sup>VLQ: Very Low  $Q^2$

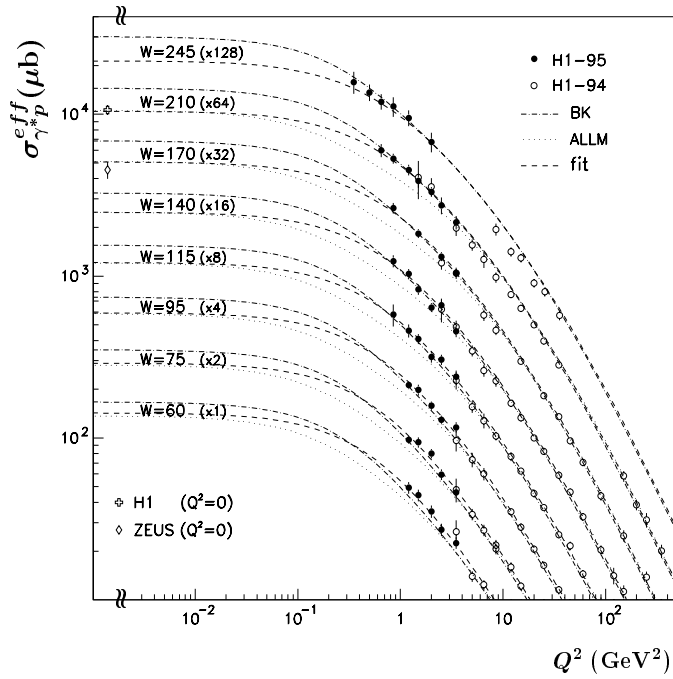


Abbildung 1.5: Der vom H1-Detektor gemessene Photon-Proton-Wirkungsquerschnitt als Funktion von  $Q^2$  mit der invarianten Masse  $W$  als Parameter. Die Kurven sind mit den in Klammern angegebenen Faktoren skaliert [4].

Dies ist die Motivation für den Bau des VLQ-Spektrometers, dessen Akzeptanz gerade im bislang nicht abgedeckten Bereich  $0.02 < Q^2 < 1 \text{ GeV}^2$  liegt. Den  $Q^2$ -Werten, bei denen das VLQ-Spektrometer mißt, entsprechen nach Gleichung 1.12 Ablenkwinkel  $\vartheta_e$  des gestreuten Elektrons, die in der Nähe von  $180^\circ$  liegen. Dies bedeutet aber, daß das gestreute Elektron kaum abgelenkt wird, da der Ablenkwinkel  $\vartheta_e$  im H1-Koordinatensystem angegeben ist und dort der Winkel  $180^\circ$  der Elektronflugrichtung entspricht. Das VLQ-Spektrometer muß also aufgrund seines  $Q^2$ -Akzeptanzbereiches sehr nahe am Strahlrohr angebracht werden.

Somit ist die Aufgabe des VLQ-Spektrometers klar: Mit seiner Hilfe soll der Meßbereich des H1-Detektors auf den bisher nicht zugänglichen kinematischen Bereich bei kleinen  $Q^2$ -Werten ausgeweitet werden.

### 1.4.2 Der Aufbau des VLQ-Spektrometers

Das VLQ-Spektrometer [4] besteht aus vier verschiedenen Komponenten. Diese sind

- ein Spurdetektor
- ein Kalorimeter
- ein Flugzeitmeßsystem (TOF: Time Of Flight Measurement)

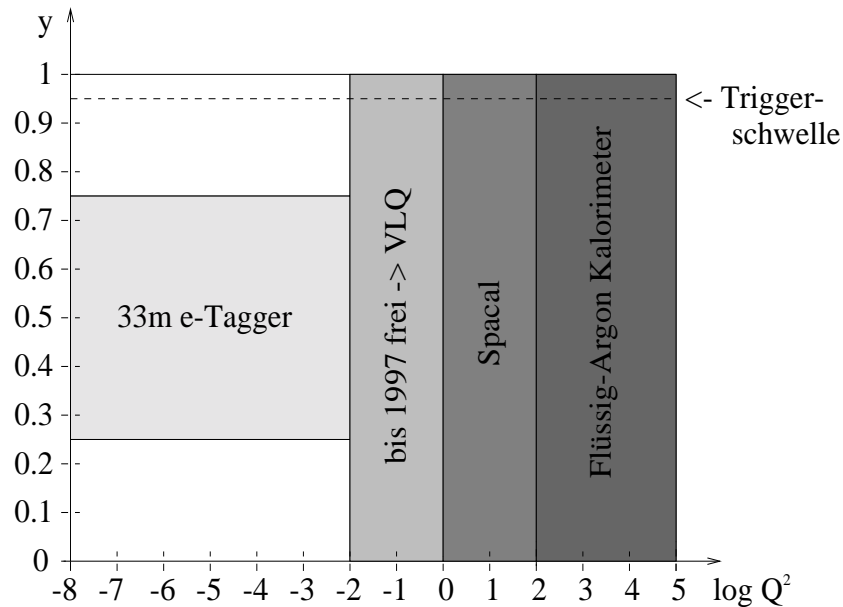


Abbildung 1.6: Die Akzeptanzbereiche der verschiedenen H1-Detektoren in der  $y - Q^2$ -Ebene dargestellt.

- ein Fahrmechanismus.

Diese Komponenten werden im folgenden genauer beschrieben.

Die Aufgabe des VLQ-Spektrometers ist es, den Bereich der kinematischen Variablen  $Q^2$  zwischen  $0.02 \text{ GeV}^2$  und  $1 \text{ GeV}^2$  abzudecken. Dies bedeutet nach Gleichung 1.12, daß die gestreuten Elektronen nur sehr wenig abgelenkt werden. Deshalb muß das VLQ-Spektrometer in Rückwärtsrichtung sehr nahe am Strahlrohr angebracht werden. Abbildung 1.7 zeigt den H1-Detektor im Querschnitt. Die Pfeile in dieser Abbildung zeigen an, an welcher Stelle das VLQ-Spektrometer in den H1-Detektor eingebaut wird. Der Einbauort befindet sich zwischen dem Kompensationsmagneten und dem Rückflußjoch (siehe dazu auch Abbildung 1.4). In Abbildung 1.7 sind im Rückwärtsbereich auch der elektromagnetische und der hadronische Teil des Spacals zu sehen. Der Winkelakzeptanzbereich des elektromagnetischen Spacals reicht von  $152^\circ$  bis hin zu  $177.5^\circ$ . Somit schließt sich die Winkelakzeptanz von  $177.3^\circ$  bis  $179.4^\circ$  und damit auch der kinematische Bereich des VLQ-Spektrometers direkt an das Spacal an.

In Abbildung 1.8 ist der Einbaubereich des VLQ-Spektrometers vergrößert dargestellt. Das VLQ-Spektrometer besteht aus zwei identischen Modulen, die oberhalb und unterhalb der Strahlröhre angebracht sind. Auf der rechten Seite befindet sich der Kompensationsmagnet, an dem das ganze System befestigt ist. Das VLQ-Spektrometer besteht, wie schon erwähnt, aus einem Spurdetektor, einem Kalorimeter, einem Flugzeitmeßsystem und einem Fahrmechanismus. Der Spurdetektor und das Kalorimeter sind am Fahrmechanismus befestigt. Für das gesamte Spektrometer steht nur ein Platz von  $50 \text{ cm}$  Länge zur Verfügung. In Abbildung 1.8 ist auch zu erkennen, daß der Durchmesser des Strahlrohres an dieser Stelle reduziert

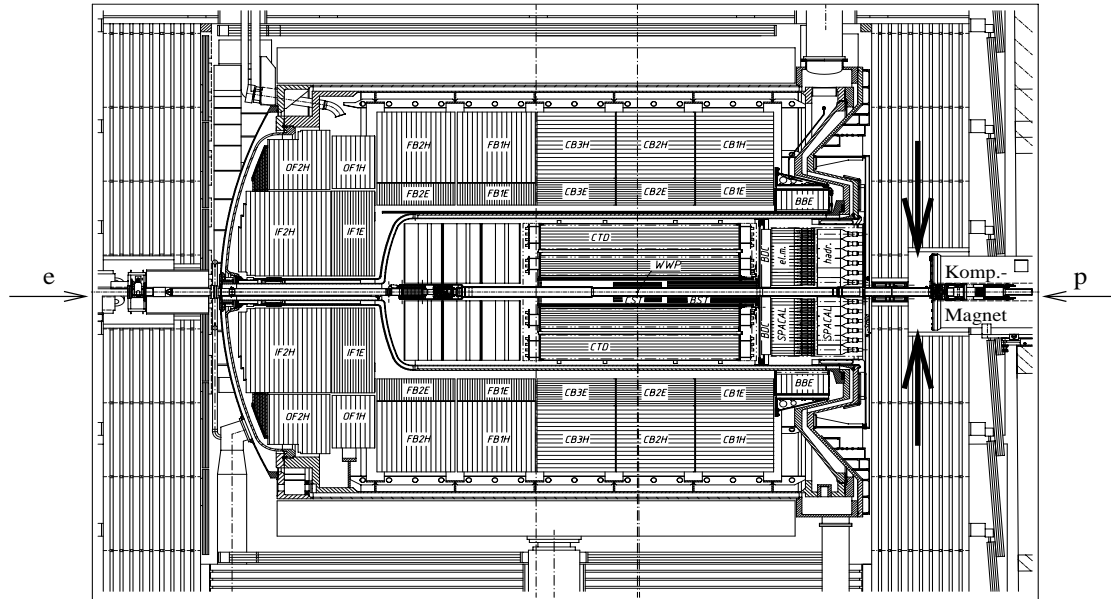


Abbildung 1.7: Querschnitt durch den H1-Detektor. Die Pfeile zeigen die Einbau-  
position des VLQ-Spektrometers an. Wie zu sehen ist, kommen die Elektronen von  
der linken, die Protonen von der rechten Seite.

ist, um unter sehr kleinen Ablenkwinkeln messen zu können. Somit wird die Menge  
des toten Materials, das die gestreuten Elektronen durchlaufen müssen, bevor sie  
den Detektor erreichen, minimiert.

## Der Spurdetektor

Der Spurdetektor ist, vom Vertex aus gesehen, die erste Komponente des VLQ-  
Spektrometers, die von den gestreuten Elektronen passiert wird. Er besteht aus  
zwei Doppellagen von Streifendetektoren, die einen Abstand von 13 cm in Strahl-  
richtung voneinander haben. Der Spurdetektor hat die Aufgabe, den Ablenkwinkel  
des gestreuten Elektrons zu messen.

Die zwei Ebenen jeder Doppellage, die die  $x$ - bzw.  $y$ -Position des Durchstoß-  
punktes des Elektrons durch die Doppellage mit Hilfe von vertikal bzw. horizontal  
orientierten Streifen messen, haben eine aktive Fläche von  $\sim 8 \times 10 \text{ cm}^2$ . Diese Dop-  
pellingen bestehen aus Silizium (Si). Die Ladung, die das gestreute Elektron beim  
Durchqueren des Halbleitermaterials darin deponiert, wird durch das vorhandene  
elektrische Feld an die Elektroden geleitet, die in Streifen segmentiert sind. Der  
Abstand zwischen zwei Streifenmitten beträgt  $62.5 \mu\text{m}$ . Damit kann der Durch-  
stoßpunkt mit einer Auflösung von  $18 \mu\text{m}$  bestimmt werden. Mit Hilfe der so be-  
stimmten zwei Durchstoßpunkte des gestreuten Elektrons durch die beiden Spurdetektor-  
doppellingen kann die Spur des Elektrons bestimmt werden. Somit kann auch  
der Schnittpunkt der Spur mit der  $z$ -Achse des H1-Koordinatensystems und damit  
auch die  $z$ -Koordinate des Vertex bestimmt werden, indem man die erhaltene Spur

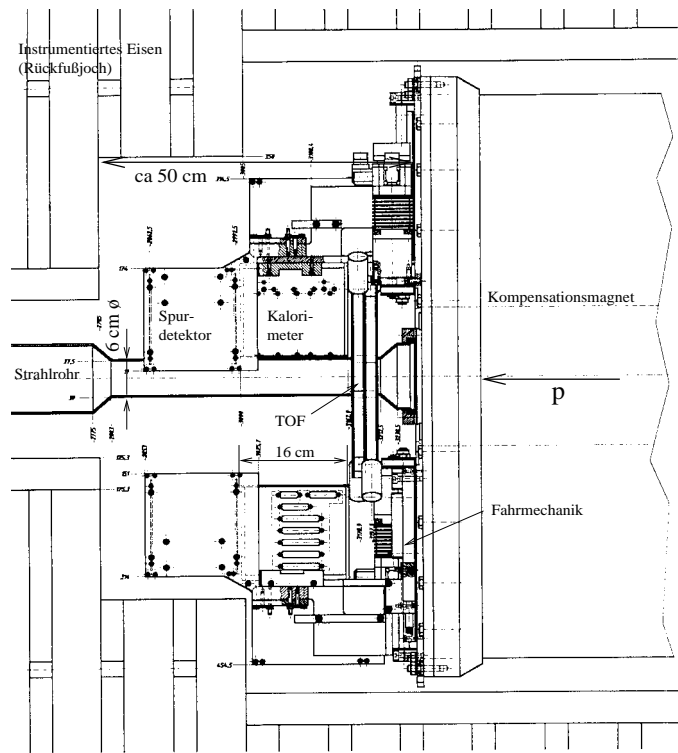


Abbildung 1.8: Der Einbaubereich des VLQ-Spektrometers im Detail. Der Kompensationsmagnet, an dem das gesamte Spektrometer befestigt ist, ist im rechten Teil zu sehen.

in  $+z$ -Richtung zurückverfolgt.

Da sich die Einbauposition des VLQ-Spektrometers in den H1-Detektor sehr nahe am Strahlrohr befindet, kann es bei der Spurrekonstruktion zu Mehrdeutigkeiten kommen. Diese kommen dadurch zustande, daß Synchrotronstrahlungsphotonen, die durch den Elektronenstrahl erzeugt werden, mit den Halbleiterdetektoren z.B. über den Photoeffekt wechselwirken und somit Spuren vortäuschen können, die die Rekonstruktion der tatsächlichen Spur erschweren. Um diese Mehrdeutigkeiten in der Spurrekonstruktion zu vermeiden, sind die beiden VLQ-Module ober- und unterhalb der Strahlröhre angebracht, da die Synchrotronstrahlung in der Ebene tangential zur Krümmung des Strahls konzentriert ist.

### Das Kalorimeter

Die zweite Komponente des VLQ-Spektrometers, die dem Spurdetektor in  $-z$ -Richtung folgt, ist das Kalorimeter (siehe Abbildung 1.8). Es hat die Aufgabe, die Energie des gestreuten Elektrons sowie deren Auftreffpunkt auf das Kalorimeter zu bestimmen. Dadurch kann die Mehrdeutigkeit in der Spurrekonstruktion, die durch die Synchrotronstrahlung verursacht wird, beseitigt werden. Da die Energie der Synchrotronstrahlungsphotonen nur bis zu einigen MeV beträgt und das Kalorimeter erst für Energien ab 1 GeV sensitiv wird, verursachen die Photonen somit

im Gegensatz zu den gestreuten Elektronen kein Signal im Kalorimeter. Wenn das Kalorimeter einen Auftreffpunkt bestimmen kann, dann muß die Spur des gestreuten Elektrons, die mit Hilfe des Spurdetektors bestimmt wurde, genau auf diesen Auftreffpunkt zeigen. Falls dies nicht der Fall ist, so wurde die Spur von einem Synchrotronphoton erzeugt, da diese Spuren im allgemeinen nicht auf den rekonstruierten Auftreffpunkt im Kalorimeter zeigen. Um mit Sicherheit entscheiden zu können, ob eine rekonstruierte Spur auf einen rekonstruierten Auftreffpunkt zeigt, muß die Ortsauflösung des VLQ-Kalorimeters im Bereich von 1 mm liegen.

### Das Flugzeitmeßsystem (TOF)

Wie in Abbildung 1.8 zu sehen ist, ist die dritte Komponente des VLQ-Spektrometers, die sich in  $-z$ -Richtung befindet, das Flugzeitmeßsystem. Es hat die Aufgabe, solche Ereignisse zu unterdrücken, die durch die inelastische Wechselwirkung des Protonenstrahls mit Restgasatomen im Strahlrohr oder mit der Strahlrohrwand entstehen. Diese Ereignisse bezeichnet man als sogenannten Proton-induzierten Untergrund. Solche Ereignisse können über die gesamte Länge des HERA-Speicherringes stattfinden. Allerdings treffen Teilchen aus dem Proton-induzierten Untergrund den H1-Detektor immer aus  $-z$ -Richtung kommend, da sich diese Teilchen durch den Protonimpuls in Richtung des Protonstrahls bewegen. Um zu verhindern, daß solche Teilchen ein Auslesen des H1-Detektors verursachen, mißt der TOF-Detektor die Zeit, die zwischen der Elektron-Proton-Kollision und dem Auftreffen von Teilchen auf das TOF-System vergeht. Bei Teilchen, die vom Wechselwirkungspunkt kommen, ist das Signal im TOF-Detektor gegenüber dem Zeitpunkt des Bunch-Crossings um die Zeit verspätet, die das Teilchen braucht, um vom Vertex zum TOF-System zu gelangen. Bei Untergrundereignissen hingegen tritt das Signal im TOF-Detektor früher auf als die Elektron-Proton-Kollision, da diese Teilchen aus  $-z$ -Richtung kommend in den Detektor eindringen. Der TOF-Detektor kann also dazu benutzt werden, Ereignisse zu verwerfen, die zu früh auftreten. Aber auch die Signale, die im TOF-Detektor durch Synchrotronstrahlung aus der Elektronenflugrichtung verursacht werden, treten genauso wie die "guten" Ereignisse verspätet gegenüber dem Bunch-Crossing-Zeitpunkt auf. Deshalb kann der TOF-Detektor nicht entscheiden, ob ein "gutes" Ereignis stattgefunden hat.

Zusammenfassend kann also festgestellt werden, daß bei jedem ausgelesenen Ereignis die vom TOF-System gemessene Zeit einen gewissen Schwellenwert überschreiten muß.

### Der Fahrmechanismus

Die vierte Komponente des VLQ-Spektrometers ist ein Fahrmechanismus. Wie Abbildung 1.8 zeigt, sind der Spurdetektor und das Kalorimeter an dieser Fahrmechanik befestigt. In dieser Abbildung ist das obere Modul ganz an das Strahlrohr herangefahren, befindet sich also in Meßposition, während das untere Modul hinter dem Eisen in Ruheposition ist. Der Fahrmechanismus hat die Aufgabe, das VLQ-Spektrometer vor Strahlenschäden zu schützen, die verursacht werden können,



wenn die Teilchenstrahlen durch eine Fehlsteuerung direkt auf die Detektoren treffen. Die Fahrmechanik erlaubt es auch, bei schlechten Untergrundbedingungen, die durch Synchrotronstrahlung verursacht werden, das Spektrometer so weit von der Strahlröhre zu entfernen, bis ein sinnvolles Messen wieder möglich ist.

Um genaue Aussagen über die Kinematik machen zu können, muß die exakte Position des VLQ-Spektrometers bekannt sein. Deshalb muß die Position des Fahrtisches mit mindestens der gleichen Präzision bekannt sein, mit welcher der Spurdetektor die Position bestimmen kann. Um die geforderte Genauigkeit von  $20 \mu\text{m}$  zu erreichen, sind am Fahrtisch Meßvorrichtungen angebracht, welche es erlauben, die Position mit einer Präzision von etwa  $1 \mu\text{m}$  zu bestimmen.



# Kapitel 2

## Das VLQ-Kalorimeter

### 2.1 Elektromagnetische Kalorimeter

#### 2.1.1 Schauerausbreitung

Im folgenden wird ein kurzer Überblick über die wesentlichen Vorgänge, die in einem elektromagnetischen Kalorimeter stattfinden, gegeben. Eine detailliertere Beschreibung zur Theorie von Kalorimetern findet sich z.B. in [5].

Die Aufgabe von elektromagnetischen Kalorimetern ist es, die Energie von Elektronen, Positronen und Photonen zu messen. Dazu müssen die Teilchen im Kalorimeter vollständig absorbiert werden. Hierbei wird ausgenutzt, daß diese Teilchen in der Kalorimetermaterie durch verschiedene Prozesse eine Kaskade von Sekundärteilchen, einen sogenannten Schauer, erzeugen. Die Art der Wechselwirkung zwischen den Teilchen und der sie umgebenden Materie hängt davon ab, ob es sich um geladene oder neutrale Teilchen handelt. Die Prozesse, über die Photonen mit Materie wechselwirken können, sind Photoeffekt, Compton-Effekt und Paarbildung. Dabei ist die Paarbildung, bei der das Photon im Feld eines Kerns in ein Elektron-Positron-Paar konvertiert, bei Photonenenergien von mehr als einigen MeV der dominierende Prozeß.

Für geladene Teilchen hingegen beruhen die Nachweisprinzipien zumeist auf ihrer elektromagnetischen Wechselwirkung mit dem sie umgebenden Medium. Alle dabei stattfindenden Prozesse haben einen Energieverlust der einlaufenden Teilchen zur Folge. Für Elektronen ist wegen ihrer geringen Masse die Bremsstrahlung der dominierende Prozeß, der zu einem Energieverlust dieser Teilchen führt. Dabei strahlt das Elektron im Feld eines Kerns Energie in Form von Photonen ab. Ein weiterer Prozeß ist die Ionisation der Atome in der Materie. Der durch Ionisation verursachte Energieverlust pro zurückgelegter Wegstrecke kann dabei mit Hilfe der Bethe-Bloch-Formel beschrieben werden. Die Energie, bei der die Energieverluste durch Ionisation und Bremsstrahlung für Elektronen gleich groß sind, heißt kritische Energie  $E_c$ . Sie wird gegeben durch

$$E_c = \frac{580 \text{ MeV}}{Z}. \quad (2.1)$$

Hierbei ist  $Z$  die Kernladungszahl des Kalorimetermaterials. Oberhalb dieser Energie  $E_c$  überwiegt für Elektronen der Energieverlust durch Bremsstrahlung, unterhalb ist der Energieverlust durch Ionisation ausschlaggebend. Für hochenergetische Elektronen stellt die Strahlungslänge  $X_0$  eine wichtige Materialgröße dar. Sie beschreibt die Wegstrecke, die von einem Elektron durchlaufen werden muß, damit dessen Energie durch Bremsstrahlung um den Faktor  $e$  reduziert wird.

Bei hohen Energien, die über einigen GeV liegen, verlieren also Elektronen ihre Energie fast ausschließlich durch Bremsstrahlung, während Photonen ihre Energie durch Paarbildung im Kalorimetermaterial verlieren. Durch die Sekundärteilchen, die dabei erzeugt werden, kommt es im Kalorimeter zur Bildung eines elektromagnetischen Schauers. Aufgrund dieser Schauerausbreitung im Kalorimeter wird die Energie dort nicht an einem Punkt deponiert, sondern es ergibt sich eine dreidimensionale Energieverteilung im Kalorimeter. Die longitudinale Verteilung des Energieverlustes läßt sich durch

$$\frac{dE}{dt} = \text{const} \cdot t^a e^{-b \cdot t} \quad (2.2)$$

beschreiben. Hierbei sind  $a$  und  $b$  Parameter und  $t = \frac{x}{X_0}$  die Schauertiefe in Einheiten der Strahlungslänge  $X_0$ . Die Materialgröße, die die transversale Ausdehnung eines elektromagnetischen Schauers charakterisiert, ist der Molière-Radius  $R_M$ , der durch

$$R_M = \frac{21 \text{MeV}}{E_c} X_0 \quad (2.3)$$

gegeben ist. Für alle Materialien gilt, daß 95% der Schauerenergie in einem Zylinder mit Radius  $2R_M$  um die Schauerachse enthalten sind. Da die radiale Schauerverteilung im Mittel rotations-symmetrisch ist, kann man aus der im Kalorimeter gemessenen Energieverteilung auf den tatsächlichen Auftreffpunkt des Teilchens auf das Kalorimeter schließen.

### 2.1.2 Kalorimetereigenschaften

Um die Energie eines einfallenden Teilchens messen zu können, muß das Kalorimeter ein Material enthalten, in dem das Signal, das durch den Energieverlust des Teilchens erzeugt wird, nachgewiesen werden kann. Die Art des erzeugten Signals hängt vom jeweiligen Nachweismaterial ab. Wenn als Nachweismaterial ein szintillierendes Medium verwendet wird, so kann das Licht, das bei der Rekombination der angeregten Elektronen des Szintillatormaterials entsteht, nachgewiesen werden. Die entstehende Lichtmenge ist proportional zur Gesamtwegstrecke, die alle ionisierenden Teilchen im aktiven Material zurücklegen. Diese Gesamtwegstrecke ist wiederum proportional zur Energie des einfallenden Teilchens. Somit folgt also, daß die durch ein einfallendes Teilchen im Kalorimeter erzeugte Lichtmenge proportional zur Energie des Teilchens ist.

Prinzipiell gibt es zwei verschiedene Arten von Kalorimetern:

- **Homogene Kalorimeter**
- **Sampling-Kalorimeter.**

Bei homogenen Kalorimetern wird nur ein Material verwendet, das gleichzeitig als Absorber- und als Nachweismaterial dient. Beispiele für homogene Kalorimeter sind NaJ-Kristalle und Bleiglas. Da die Strahlungslänge mit wachsender Kernladungszahl abnimmt, werden Materialien mit hoher Kernladungszahl verwendet, um das Kalorimeter möglichst kompakt zu halten.

Sampling-Kalorimeter dagegen bestehen aus zwei verschiedenen Materialien: einem aktiven und einem passiven Medium. Der elektromagnetische Schauer, der sich im Kalorimeter ausbildet, ist dabei nur im aktiven Material sichtbar, wird also nur an bestimmten Stellen abgetastet. Daher kommt auch der Name "Sampling<sup>1</sup>-Kalorimeter". Da das VLQ-Kalorimeter ein Sampling-Kalorimeter ist, wird im folgenden auf diesen Kalorimeter-Typ näher eingegangen.

Für jeden Detektor ist sein Auflösungsvermögen für die Größe, die er messen soll, ein Qualitätsmerkmal. Im Falle des VLQ-Kalorimeters ist diese Größe also die Energie. Die relative Energieauflösung eines Sampling-Kalorimeters kann allgemein durch die Gleichung

$$\frac{\sigma(E)}{E} = \sqrt{\left(\frac{P_1}{\sqrt{E/\text{GeV}}}\right)^2 + (P_2)^2 + \left(\frac{P_3}{E/\text{GeV}}\right)^2} \quad (2.4)$$

beschrieben werden.

Wie Gleichung 2.4 zeigt, setzt sich die Energieauflösung aus drei Beiträgen zusammen. Der erste Beitrag  $\frac{P_1}{\sqrt{E}}$  ist der Samplingterm, der durch statistische Fluktuationen der Abtastung zustande kommt. Da für ein Sampling-Kalorimeter der Schauer nur im aktiven Medium sichtbar ist, wird die Anzahl  $N$  der Schauerteilchen über die Spurlänge der geladenen Teilchen im aktiven Material bestimmt. Diese Anzahl  $N$  der Schauerteilchen ist proportional zur Anfangsenergie  $E$  und fluktuiert gemäß der Poissonstatistik mit  $\sqrt{N}$ . Die Proportionalitätskonstante  $P_1$  ist für jedes Kalorimeter eine charakteristische Größe.

Der zweite Beitrag, der in Gleichung 2.4 zur relativen Energieauflösung beiträgt, ist der sogenannte konstante Term  $P_2$ . Er kommt dadurch zustande, daß aus einem endlich ausgedehnten Kalorimeter Schauerteilchen austreten können, was zu einem Energieverlust im Kalorimeter führt. Da diese Fluktuationen in etwa linear mit der Energie ansteigen, liefert der konstante Term  $P_2$  für die relative Energieauflösung einen konstanten Beitrag. Auch eine fehlende bzw. falsche Kalibration des Kalorimeters trägt zum konstanten Term bei.

Schließlich trägt das Rauschen der Elektronik, die das Kalorimeter ausliest, den Term  $\frac{P_3}{E}$  zur Energieauflösung bei. Es liefert eine Schwankung des ausgelesenen Kalorimetersignals, die durch die Überlagerung des eigentlichen Signals mit dem durch das Rauschen verursachten Signal zustande kommt. Diese Schwankung ist unabhängig von der Energie. Für große Energien  $E$  wird der Rauschterm  $\frac{P_3}{E}$  klein, so daß er nur noch wenig beiträgt.

Da alle drei Beiträge zur relativen Energieauflösung eines Sampling-Kalorimeters unabhängig voneinander sind, kann man sie quadratisch zur Gesamtauflösung addieren (siehe Gleichung 2.4).

---

<sup>1</sup>sample (engl.): Muster, Probe

## 2.2 Das VLQ-Kalorimeter

Das VLQ-Kalorimeter [6] wurde entwickelt, um gestreute Elektronen bei sehr kleinen Werten der kinematischen Variablen  $Q^2$  nachzuweisen. Dabei liegt die Energie der gestreuten Elektronen in einem Bereich von wenigen GeV bis hin zu einer durch die Kinematik beschränkten Maximalenergie von 27.56 GeV (Elektronenstrahlenergie). Der gesamte für das VLQ-Kalorimeter zur Verfügung stehende Platz im H1-Detektor ist auf eine Länge von 16 cm beschränkt, in welcher sowohl die aktive Struktur als auch die Ausleselektronik enthalten sein muß. Deshalb muß das Kalorimeter extrem kompakt realisiert werden.

### 2.2.1 Prinzipieller Aufbau

In Abbildung 2.1 ist eine schematische Darstellung des VLQ-Kalorimeters gezeigt. Das VLQ-Kalorimeter ist, wie in dieser Abbildung zu sehen ist, ein Sampling-Kalori-

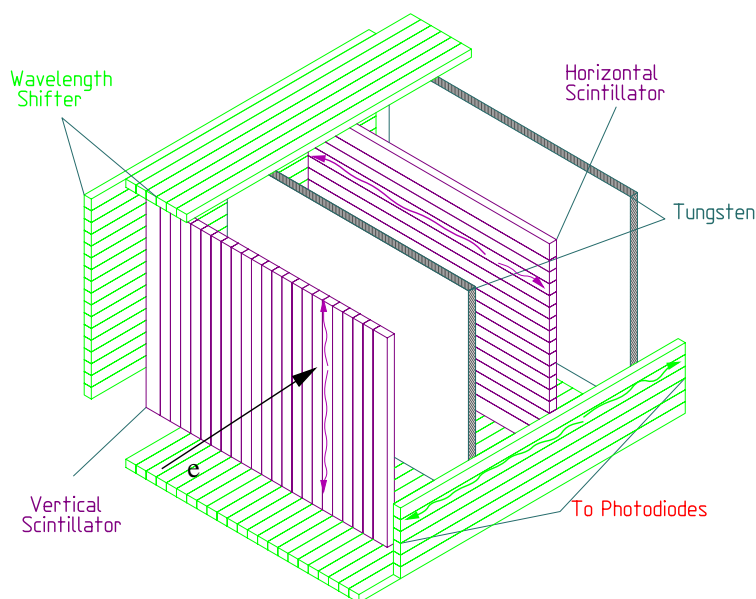


Abbildung 2.1: Schematische Darstellung des VLQ-Kalorimeters. Als aktives Material dienen Plastikszintillatorstreifen, die abwechselnd horizontal und vertikal ausgerichtet sind. Das Licht, das in den Szintillatoren entsteht, wird von den seitlich angeordneten Wellenlängenschiebern absorbiert und zu deren Stirnflächen geleitet, wo es von Photodioden nachgewiesen wird. Als Absorbermaterial dient Wolfram [4].

meter, das aus abwechselnden Schichten von Wolfram als passivem Material und aus aktivem Szintillatormaterial besteht. Mit seiner hohen Kernladungszahl ( $Z=74$ ) und seiner großen Dichte ( $\rho = 19.3 \text{ g/cm}^3$ ) eignet sich Wolfram besonders gut, um die geforderte Kompaktheit des Kalorimeters bei gleichzeitig großer Strahlungslänge zu gewährleisten.

Das VLQ-Kalorimeter unterscheidet sich von gewöhnlichen Sandwich-Kalorimetern dadurch, daß die Szintillatorflächen in Streifen segmentiert sind, wobei die Streifen abwechselnd von Szintillatorschicht zu Szintillatorschicht in  $x$ - bzw.  $y$ -Richtung orientiert sind. Diese Segmentierung erlaubt es, den Auftreffpunkt des Elektrons auf das Kalorimeter zu rekonstruieren. Das Prinzip dieser Methode beruht darauf, daß der durch das einlaufende Elektron im Kalorimeter ausgelöste elektromagnetische Schauer nur in den Szintillatorstreifen Licht erzeugt, die vom Schauer erfaßt werden. Die  $x$ -Koordinate des Auftreffpunktes kann man somit mit den vertikalen, in  $y$ -Richtung orientierten Streifen bestimmen, und die  $y$ -Koordinate mit den horizontalen, in  $x$ -Richtung orientierten Streifen.

Die Segmentierung der Szintillatorschichten setzt voraus, daß das Licht, das in einem Szintillatorstreifen erzeugt wird, auch darin verbleibt und nicht in die Nachbarstreifen gelangt. Um dies zu erreichen, wurden alle Szintillatorstreifen mit weißem Papier umwickelt, das das aus den Streifen austretende Licht absorbiert oder teilweise auch reflektiert. Da die Totalreflexion an der Grenzfläche Szintillator-Luft somit erhalten bleibt, können die Szintillatorstreifen als Lichtleiter wirken und das Licht zu ihren Stirnseiten leiten. Dort wird dann das austretende blaue Szintillatorlicht von Wellenlängenschieberstreifen absorbiert, die längs der aktiven Struktur angeordnet sind und deren Breite genau der Breite der Szintillatorstreifen entspricht. Jeder einzelne Wellenlängenschieber absorbiert dabei das blaue Licht aller gleich orientierten Szintillatorstreifen der einzelnen Szintillatorschichten. Die Wellenlängenschieber reemittieren das absorbierte blaue Licht im grünen Wellenlängenbereich. Dieses in den Wellenlängenschiebern erzeugte Licht wird zu deren Stirnseiten weitergeleitet, wo es von Photodioden nachgewiesen wird.

Nicht die ganze in einem Szintillatorstab erzeugte Lichtmenge kann von den Photodioden nachgewiesen werden. Der Anteil des entstandenen Lichtes, das durch Totalreflexion im Szintillatorstab verbleibt, beträgt nur etwa 50 %. Ein weiterer Effekt, der die Lichtausbeute verringert, ist die Abschwächung des Szintillatorlichtes im Szintillatorstab. Da die Weiterleitung des Lichtes zu den Szintillatortenden durch Reflexionen an der Grenzfläche Szintillator-Luft geschieht, kann es dadurch und durch Unregelmäßigkeiten an der Szintillatoroberfläche zu Lichtverlusten kommen. Abbildung 2.2 zeigt das Ergebnis einer Messung der Lichtausbeute im Szintillatorstab in Abhängigkeit der Entfernung des Entstehungsortes des Lichtes von der Auslesefläche. Deutlich zu erkennen ist der starke Anstieg der Meßwerte bei kleinen Abständen. Dieser Anstieg kommt dadurch zustande, daß bei kleinen Abständen zwischen der Auslesefläche und dem Lichtenstehungsort ein großer Teil des Lichtes direkt ohne Reflexionen zur Auslesefläche gelangt. Wird diese Entfernung größer, so wird der Anteil des Lichtes, der durch Reflexionen zur Auslesefläche transportiert wird, immer größer und somit die Lichtausbeute geringer.

## 2.2.2 Die aktive Struktur

Die aktive Struktur des VLQ-Kalorimeters ist in Abbildung 2.3 dargestellt. Diese ist 129.5 mm lang, was einer Gesamttiefe von 15.3 Strahlungslängen entspricht. Der Molière-Radius beträgt 1.25 cm. Die aktive Struktur besteht aus 23 Absorberschich-

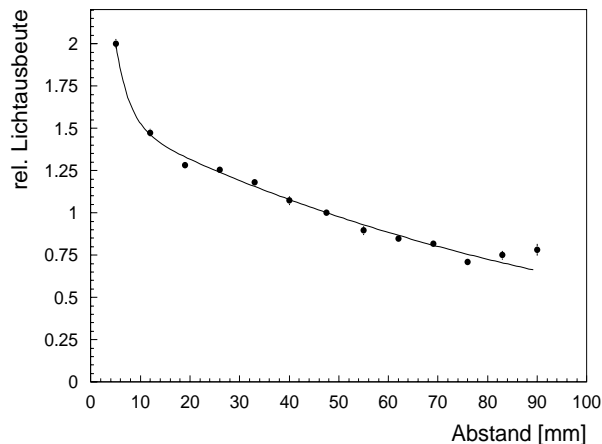


Abbildung 2.2: Die relative Lichtausbeute als Funktion der Distanz zwischen Entstehungsort und Auslesefläche, wobei die Meßwerte auf den Wert in der Mitte des Szintillatorstabes normiert sind [6].

ten, die jeweils eine Dicke von 2.5 mm, eine Breite von 124 mm und eine Höhe von 94 mm haben. Die Absorberschichten bestehen nicht aus reinem Wolfram, sondern aus einem Material, das 95 % Wolfram und 5 % Nickel-Kupfer-Binder enthält. Dies verbessert die mechanische Verarbeitbarkeit dieses Materials, das eine Strahlungslänge von 3.9 mm hat. Die 24 Szintillatorschichten der aktiven Struktur des VLQ-Kalorimeters bestehen aus 3 mm dicken Szintillatorstreifen, die abwechselnd von Schicht zu Schicht in  $x$ - bzw.  $y$ -Richtung, also horizontal bzw. vertikal, orientiert sind. Die in  $x$ -Richtung orientierten Szintillatorschichten bestehen jeweils aus 16 Szintillatorstreifen, die 5 mm breit sind, und aus zwei Streifen am Rand, die 7 mm breit sind. Diejenigen Szintillatorschichten, die in  $y$ -Richtung orientiert sind, sind jeweils aus 22 Szintillatorstreifen von 5 mm Breite und aus zwei Randstreifen von 7 mm Breite aufgebaut. Die horizontalen Szintillatorstreifen werden rechts und links jeweils mit 18 Wellenlängenschieberstreifen, die vertikalen Szintillatorstreifen oben und unten mit jeweils 24 Wellenlängenschieberstreifen ausgelesen. Dabei beträgt die Dicke jedes Wellenlängenschieberstreifens 5 mm.

Für jedes Kalorimetermodul ergibt sich eine Gesamtzahl von 168 Photodioden, da jedes Ende eines Wellenlängenschieberstreifens von einer Photodiode ausgelesen wird. Zur Auslese werden aus Platzgründen keine einzelnen Photodioden verwendet, sondern Leisten mit mehreren Photodioden, sogenannte "Photodioden-Arrays<sup>2</sup>". Diese haben entsprechend der verschiedenen langen Ausleseseiten des Kalorimeters jeweils 18 bzw. 24 Kanäle. Da die beiden Photodiodensignale jedes Wellenlängenschieberstreifens elektronisch aufsummiert werden, ergibt sich eine Gesamtzahl von 84 Auslesekanälen pro Kalorimetermodul. Das Wort "Array" bezeichnet im folgenden die 18 bzw. 24 Auslesekanäle der vertikalen bzw. horizontalen Seiten jedes Moduls. Jedes der beiden VLQ-Module wird also von zwei horizontalen Arrays mit jeweils 24 und zwei vertikalen Arrays mit jeweils 18 Kanälen ausgelesen.

---

<sup>2</sup>array (engl.): Reihe



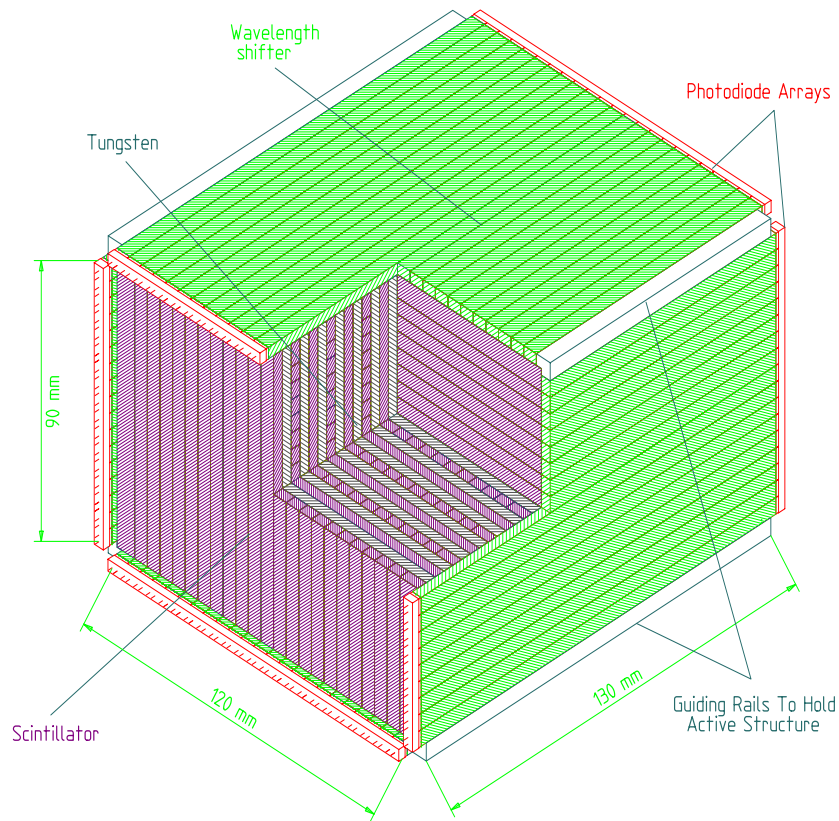


Abbildung 2.3: Die aktive Struktur des VLQ-Kalorimeters [4].

Die Signale der Auslesekanäle liefern vier Messungen des Schauerprofils, zwei horizontale und zwei vertikale Projektionen, aus denen die  $x$ - und  $y$ -Koordinate des Auftreffpunktes des gestreuten Elektrons auf das Kalorimeter sowie die Elektronenergie rekonstruiert werden können. Dabei wird der Auftreffpunkt durch eine Berechnung des energiegewichteten Schwerpunktes rekonstruiert, und die Energie des Elektrons kann aus der Summe aller Energiedepositionen im Kalorimetermodul berechnet werden. Diese Methoden zur Orts- und Energierekonstruktion werden im nächsten Abschnitt genauer beschrieben. In Abbildung 2.4 sind die vier Projektionen des Schauerprofils zu erkennen, wobei das Ereignis in dieser Abbildung ein Elektron mit einer Energie von 5 GeV aus dem DESY-Teststrahl ist, das im oberen VLQ-Modul nachgewiesen wurde. Dabei wird der topologisch zusammenhängende Bereich im Kalorimeter, in dem ein Teilchen seine Energie deponiert hat, als "Cluster<sup>3</sup>" bezeichnet.

In Abbildung 2.4 ist auch die Numerierung der Auslesekanäle zu sehen. Die Kanalnummern des oberen Moduls gehen von 1 bis 84, wobei der Kanal mit der Nummer 1 der oberste Kanal des rechten vertikalen Arrays und der Kanal mit der Nummer 84 der Randkanal auf der rechten Seite des oberen horizontalen Arrays ist. Das untere Kalorimetermodul wird von den Kanälen 85 bis 168 ausgelesen.

---

<sup>3</sup>cluster (engl.): Anhäufung

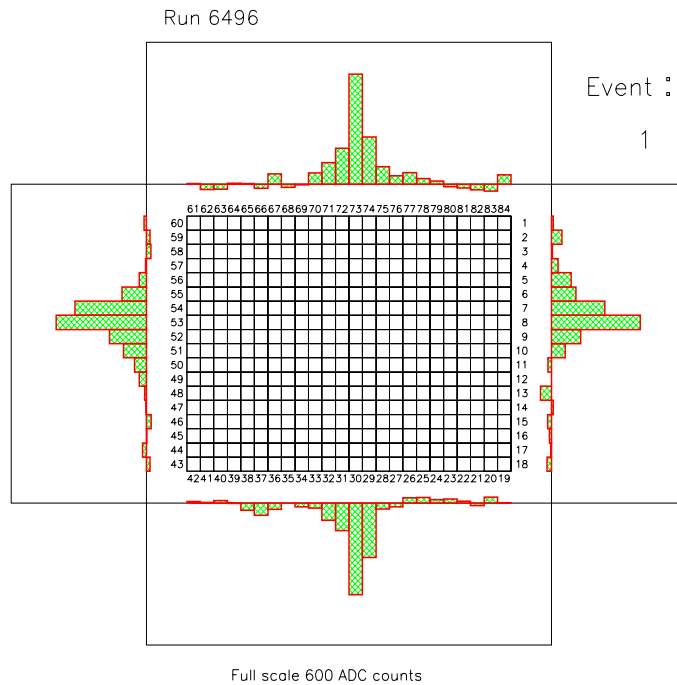


Abbildung 2.4: Eventdisplay eines mit dem VLQ-Kalorimeter gemessenen Elektrons mit einer Energie von 5 GeV [6].

Dabei ist Kanal 85 der unterste Kanal des linken vertikalen Arrays (entspricht Kanal 43 des oberen Moduls). Die Kanäle werden von Nummer 85 bis Nummer 168 im Uhrzeigersinn durchgezählt, so daß der Randkanal auf der linken Seite des unteren horizontalen Arrays die Nummer 168 hat (entspricht Kanal 42 des oberen Moduls).

Da das VLQ-Kalorimeter jeweils zwei horizontale bzw. vertikale Projektionen des Schauerprofils liefert, ist es möglich, sogenannte "Single-Diode-Ereignisse" zu unterdrücken. Solche Ereignisse werden von geladenen Teilchen verursacht, die die Photodiode durchqueren und dabei durch Ionisation in der Sperrschicht ein Signal erzeugen. Da dieses Signal aber nur in einer einzelnen Photodiode erzeugt wird, das durch den Schauer entstandene Licht aber über mehrere Kanäle in jedem Array des Kalorimetermoduls verteilt ist (siehe Abbildung 2.4), können diese "Single-Diode-Ereignisse" durch einen Vergleich der beiden Schauerprojektionen auf der linken und rechten bzw. oberen und unteren Seite des Kalorimeters identifiziert werden.

### 2.2.3 Die Ausleseelektronik

Wie bereits beschrieben, wird jeder Wellenlängenschieber eines VLQ-Moduls an beiden Enden von je einer Photodiode ausgelesen, wobei die Summe aus diesen beiden Photodiodensignalen dann einen Auslesekanal bildet. Eine schematische Darstellung der Auslekette für einen Auslesekanal ist in Abbildung 2.5 gezeigt. Da durch Verluste auf dem Weg vom Entstehungsort des Lichtes bis zur Photodiode nur 5-10% des vom Schauer erzeugten Lichtes ein Photodiodensignal auslösen, müssen diese

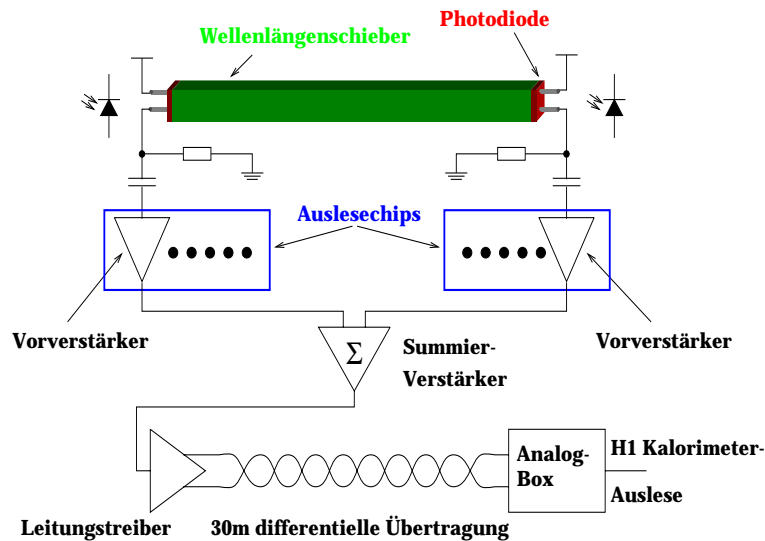


Abbildung 2.5: Die Auslekette des VLQ-Kalorimeters für einen Kanal [6].

Signale zuerst verstärkt und geformt werden. Dies geschieht durch einen speziell entwickelten Auslesechip (FroPhoDiChi, **F**ronted **P**hoto **D**iode **R**eadout **C**hip) [6]. Anschließend werden die beiden verstärkten Signale summiert und schließlich durch einen Leitungstreiber differentiell über ca. 30 m Kabel zur sogenannten Analog-Box transportiert. In dieser befinden sich acht Analogkarten, die die erhaltenen Signale verzögern und zwischenspeichern, um die Zeit zu überbrücken, die der Trigger des H1-Detektors für die Triggerentscheidung braucht. Wird vom Trigger das Signal zur Auslese des Kalorimeters gegeben, so werden die gespeicherten Spannungen zur H1-Standard-Kalorimeter-Auslese weitergeleitet, wo sie schließlich von einem ADC (**A**nalog to **D**igital **C**onverter) durch Integration in einen ADC-Wert umgewandelt und dann abgespeichert werden. Somit werden pro VLQ-Kalorimetermodul 84 Kanäle ausgelesen.

## 2.2.4 Die Energie- und Ortsrekonstruktion

Im folgenden werden die Methoden, mit denen die Energie und der Auftreffpunkt eines Teilchens auf das Kalorimeter bestimmt wird, beschrieben.

### Die Energierekonstruktion

Die Energie der einlaufenden Teilchen muß aus den mit dem Kalorimeter gemessenen Daten rekonstruiert werden. Diese Daten sind digitalisierte Werte der Ausgangsspannungen der einzelnen Kanäle. Wenn die Ausgangsspannung eines Kanals Null Volt beträgt, dann ist der ausgelesene ADC-Wert eines Kanals nicht ebenfalls Null, sondern hat einen bestimmten Wert, der als Pedestal bezeichnet wird. Dieser kanalspezifische Wert muß vom gemessenen ADC-Wert des Kanals abgezogen werden, um den pedestalkorrigierten Meßwert zu erhalten. Somit sind negative pedestalkorrigierte ADC-Werte möglich.

In Abbildung 2.4 sind die pedestalkorrigierten ADC-Werte der Kalorimeterkanäle im Eventdisplay graphisch dargestellt. Da die Lichtmenge, die im VLQ-Kalorimeter entsteht, proportional zur Energie des einlaufenden Teilchens ist (siehe Abschnitt 2.1.2) und auch die Ausgangsspannung eines Kanals proportional zur Lichtmenge ist, die auf die Photodiode auffällt, kann die Energie des einlaufenden Teilchens rekonstruiert werden, indem man die ADC-Werte aller Kanäle aufsummiert. Die Umrechnung von ADC-Counts in Energie wird durch die Anwendung eines globalen Faktors erreicht, für den aus Teststrahlungsmessungen ein Wert von  $777 \pm 5$  ADC-Counts/GeV ermittelt wurde [6].

Bei der Kalibration des VLQ-Kalorimeters, die in dieser Arbeit vorgestellt wird, werden die Auslesekanäle der einzelnen Arrays des Kalorimeters abgeglichen, das heißt, daß für jeden Kanal ein Kalibrationsfaktor ermittelt wird, mit dem der ADC-Wert des Kanals multipliziert werden muß, um zu erreichen, daß alle Kanäle bei gleichen Eingangssignalen auch gleiche Ausgangssignale liefern. Somit wird für jeden Kanal ein eigener globaler Faktor für die Umrechnung des ADC-Werts in eine Energie bestimmt.

Da die elektromagnetischen Schauer, die im VLQ-Kalorimeter entstehen, aufgrund des kleinen Molière-Radius' von 1.25 cm eine geringe laterale Ausdehnung haben, gibt es pro Array nur wenige Kanäle, die ein deutliches Signal zeigen (siehe Abbildung 2.4). Die Mehrheit der Kanäle zeigt nur Rauschen. Um die Energie des einlaufenden Teilchens zu rekonstruieren, wird deshalb nur die Summe aus dem Kanal mit dem maximalen Signal und einer gewissen Anzahl seiner Nachbarkanäle zur rechten und linken Seite gebildet. Die Anzahl der Nachbarkanäle richtet sich nach der Energie des maximalen Kanals. Je größer diese Energie ist, desto mehr Kanäle müssen aufsummiert werden.

## Die Ortsrekonstruktion

Mit Hilfe der vom VLQ-Kalorimeter gemessenen Daten kann neben der Energie des einlaufenden Teilchens auch dessen Auftreffpunkt auf das Kalorimeter rekonstruiert werden. Da die Energieverteilung des elektromagnetischen Schauers, den das einfallende Teilchen im Kalorimeter erzeugt, symmetrisch um die Ursprungsflugrichtung ist und das VLQ-Kalorimeter bei Ablenkwinkeln mißt, die im Bereich von  $1^\circ$  liegen, kann davon ausgegangen werden, daß die gemessenen Projektionen des Schauerprofils symmetrisch um den Auftreffpunkt des Teilchens auf das Kalorimeter verteilt sind. Somit kann der Auftreffpunkt eines Teilchens rekonstruiert werden, indem man aus den mit dem Kalorimeter gemessenen Verteilungen einen energiegewichteten Schwerpunkt berechnet.

Zur Berechnung des rekonstruierten Ortes werden nur die Kanäle berücksichtigt, die auch für die Energierekonstruktion verwendet werden. Wird für jedes der beiden horizontalen und vertikalen Arrays der energiegewichtete Schwerpunkt berechnet, so erhält man je zwei Messungen der Auftreffkoordinaten in  $x$ - und  $y$ -Richtung. Die  $x$ -Koordinate des endgültigen rekonstruierten Auftreffpunktes ergibt sich dann aus dem Mittelwert der beiden Messungen in  $x$ -Richtung, die  $y$ -Koordinate aus dem Mittelwert der beiden Messungen in  $y$ -Richtung.

Wird der Schwerpunkt der in den einzelnen Arrays gemessenen Verteilungen mit einer linearen Gewichtung berechnet, bei der die Energien der einzelnen Kanäle linear mit ihrem Energiewert eingehen, so liegt der für dieses Array rekonstruierte Ort immer nahe an der Mitte des maximalen Kanals. Dies liegt daran, daß der maximale Kanal durch sein hohes Gewicht den Schwerpunkt immer anzieht. Deshalb wird bei der Schwerpunktsberechnung keine lineare, sondern eine logarithmische Gewichtung verwendet, bei der die Energien der einzelnen Kanäle mit dem Logarithmus des Energiewertes eingehen. Somit wird der rekonstruierte Ort  $x$  (bzw.  $y$ ) für jedes Array wie folgt berechnet:

$$x = \frac{\sum_{i=n_{max}-N}^{n_{max}+N} w_i x_i}{\sum_{i=n_{max}-N}^{n_{max}+N} w_i}, \quad (2.5)$$

mit

$$w_i = \begin{cases} W_0 + \ln\left(\frac{E_i}{E}\right) & , \quad \left(\frac{E_i}{E}\right) > e^{-W_0} \\ 0 & , \quad \left(\frac{E_i}{E}\right) \leq e^{-W_0} \end{cases} \quad (2.6)$$

und

$$E = \sum_{i=n_{max}-N}^{n_{max}+N} E_i. \quad (2.7)$$

Die Variable  $N$  gibt die Anzahl der Nachbarkanäle an, die zu jeder Seite des maximalen Kanals berücksichtigt werden. Der Parameter  $W_0$  hat den Wert 1.9 [6].

## 2.2.5 Die Energie- und Ortsauflösung

Die Energie- und Ortsauflösung des VLQ-Kalorimeters wurde mit Hilfe eines Teststrahls des DESY-Synchrotrons bestimmt [6]. Dieser vom Synchrotron zur Verfügung gestellte Teststrahl besteht aus Elektronen oder Positronen, deren Energien zwischen 1 und 6 GeV variiert werden können.

### Die Energieauflösung

Die Energieauflösung des VLQ-Kalorimeters wird bestimmt, indem man für eine feste Teilchenenergie die Energieverteilung mit dem Kalorimeter mißt. Der gemessenen Energieverteilung wird eine Gaußkurve angepaßt. Die relative Energieauflösung für eine bestimmte Einschußenergie ergibt sich dann aus dem Verhältnis der Breite zum Mittelwert der angepaßten Gaußkurve. In Abbildung 2.6 ist die auf diese Weise ermittelte Energieauflösung des VLQ-Kalorimeters als Funktion der Energie aufgetragen. Da das VLQ-Kalorimeter ein Sampling-Kalorimeter ist, kann seine relative Energieauflösung mit Gleichung 2.4 beschrieben werden. Zur Energieauflösung tragen also drei Terme bei: ein Samplingterm, ein konstanter Term und ein Rauschterm, wobei letzterer eine Eigenschaft der Kalorimeterauslese beschreibt und im Gegensatz zu den anderen beiden Termen nicht charakteristisch für die aktive Struktur des Kalorimeters ist. In Abbildung 2.6 entspricht die durchgezogene Linie der Anpassung einer Kurve der Form von Gleichung 2.4, wobei  $P_1$  und  $P_2$  die freien Parameter

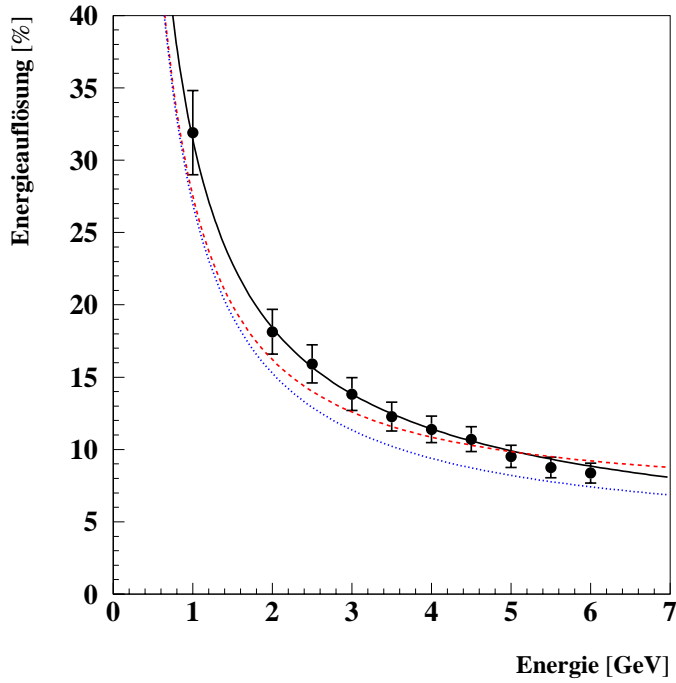


Abbildung 2.6: Die Energieauflösung des VLQ-Kalorimeters als Funktion der Einschussenergie [6].

sind. Die gestrichelte Kurve ergibt sich aus der Anpassung, wenn nur  $P_2$  frei variieren kann, die gepunktete Linie stellt die aufgrund einer Schauersimulation erwartete Energieauflösung dar.

Als Ergebnis wurde für die relative Energieauflösung des VLQ-Kalorimeters folgende Beziehung ermittelt [6]:

$$\frac{\sigma(E)}{E} = \sqrt{\left(\frac{19\% \pm 6\%}{\sqrt{E/\text{GeV}}}\right)^2 + (6.4\% \pm 3\%) + \left(\frac{23.4\% \pm 0.9\%}{E/\text{GeV}}\right)^2}. \quad (2.8)$$

## Die Ortsauflösung

Die Ortsauflösung des VLQ-Kalorimeters wurde im Teststrahl mit Hilfe eines vom Kalorimeter unabhängigen Silizium-Teleskops bestimmt. Mit dem Silizium-Teleskop kann der Auftreffpunkt der Elektronen auf das Kalorimeter mit einer Genauigkeit von 0.1 mm bestimmt werden. Durch den Vergleich dieser Ortsmessung und der Ortsmessung des Kalorimeters kann die Ortsauflösung des VLQ-Kalorimeters bestimmt werden. Dazu wird für jedes Ereignis die Differenz des mit dem Silizium-Teleskops bzw. dem Kalorimeter rekonstruierten Auftreffpunktes in ein Histogramm eingetragen. Die Ortsauflösung des VLQ-Kalorimeters ergibt sich dann direkt aus der Breite der Verteilung der Histogramme, da der Fehler aus der Messung des Silizium-Teleskops von 0.1 mm gegen die Breite der Kurven vernachlässigt werden kann. Abbildung 2.7 zeigt die ermittelten Werte für die Ortsauflösung in x- und

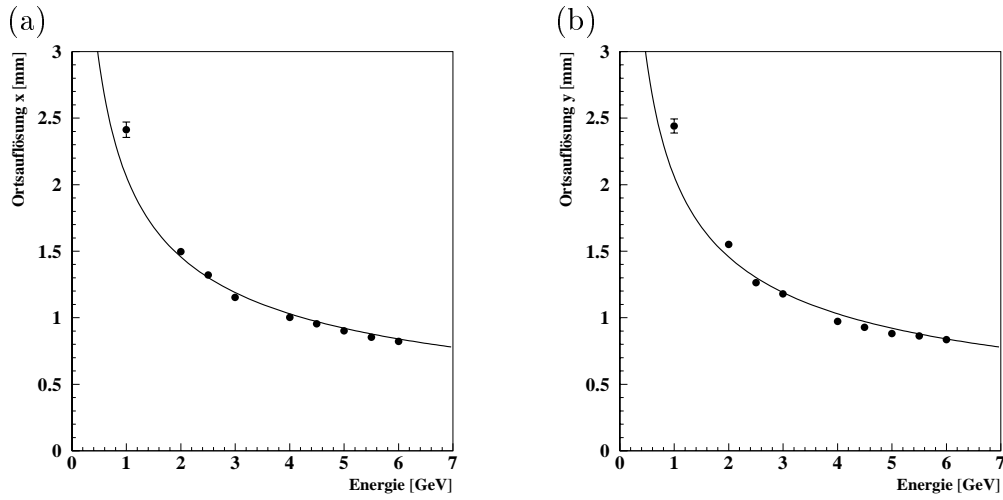


Abbildung 2.7: Die Ortsauflösung des VLQ-Kalorimeters als Funktion der Ein- schußenergie für die x- (a) und y-Koordinate (b) [6].

y-Richtung für Elektronenenergien von 1 bis 6 GeV. Wie in dieser Abbildung zu sehen ist, wird die Ortsauflösung des VLQ-Kalorimeters mit zunehmender Energie besser. Wenn man nun den Meßpunkten Kurven der Form

$$f(x) = \frac{P_1}{\sqrt{E/\text{GeV}}} \quad (2.9)$$

anpaßt, so ergibt sich für den Parameter  $P_1$  der Wert  $P_1 = (2.06 \pm 0.02)$  mm, wobei die beiden Werte für  $P_1$  für die Ortsauflösung in x- bzw. y-Richtung innerhalb des Fehlers übereinstimmen.

Als Ergebnis ergibt sich für die Energieabhängigkeit der Ortsauflösung des VLQ-Kalorimeters die Beziehung [6]:

$$\Delta x = \frac{(2.06 \pm 0.02)\text{mm}}{\sqrt{E/\text{GeV}}}. \quad (2.10)$$

## 2.2.6 Der VLQ-Kalorimeter-Trigger

Der Trigger hat die Aufgabe, interessante Ereignisse zu erkennen und die Auslese des H1-Detektors zu starten. Da das VLQ-Kalorimeter die Energie des gestreuten Elektrons aus der  $e$ - $p$ -Wechselwirkung messen soll, ist ein Ereignis für das Kalorimeter dann interessant, wenn die Energie, die im Kalorimeter deponiert wurde, über einer gewissen Schwelle liegt. Für das VLQ-Kalorimeter gibt es dabei drei verschiedene Energieschwellen: NOISE (6 GeV), LOW (8.5 GeV) und HIGH (10 GeV).

Die Triggerelemente eines Kalorimetermoduls werden gebildet, indem die zwei vertikalen Ausleseseiten jeweils in Gruppen von je 6 Kanälen zusammengefaßt werden. Von jeweils zwei benachbarten Sechsergruppen einer Ausleseseite wird die Summe gebildet, so daß sich jede dieser Summen aus den Signalen von 12 Kanälen

zusammensetzt. Auf diese Weise werden Summen gebildet, die sich überlappen. Dies ist erforderlich, da sich die Energie von Elektronen, die genau in der Mitte zweier Sechsergruppen auftreffen, auf die beiden Sechsergruppen verteilt. Ist die Energie des Elektrons nur etwas größer als die jeweilige Energieschwelle, dann würde dieses Elektron den Trigger nicht auslösen, wenn nur die Signale der einzelnen Sechsergruppen als Triggerelemente verwendet würden. Durch das Konzept der überlappenden Summen wird dieses Problem gelöst. Auch für andere Subdetektoren des H1-Detektors wird das Prinzip der überlappenden Summen verwendet, das auch mit dem Begriff "Sliding Windows" bezeichnet wird.

Durch die Summenbildung benachbarter Sechsergruppen der vertikalen Ausleseseiten ergeben sich pro Kalorimetermodul vier Summen, wobei jede dieser Summen ein Triggerelement darstellt. Diese Triggerelemente werden dann auf Diskriminatoren gegeben, wodurch überprüft werden kann, ob das Signal über einer gewissen Schwelle liegt. Die drei Schwellen für die Signale der Triggerelemente werden dabei aus den drei Energieschwellen NOISE, LOW und HIGH abgeleitet. Durch geeignete Verknüpfungen der einzelnen Triggerelemente können z.B. reine Single-Diode-Ereignisse, bei denen zusätzlich zu einem oder mehreren Single-Diode-Kanälen kein Cluster vorhanden ist, erkannt werden. Ein solches reines Single-Diode-Ereignis kann daran erkannt werden, daß von zwei gegenüberliegenden Triggerelementen nur eines dieser Signale über einer gewissen Schwelle liegt.

Die acht Triggerelemente des VLQ-Kalorimeters, die sich aus den vier Triggerelementen jedes Moduls zusammensetzen, werden dann an die zentrale Triggerlogik (CTL: **C**entral **T**ri**g**ger **L**ogic) des H1-Detektors weitergeleitet und können somit zur Bildung von L1-Subtriggern verwendet werden.



# Kapitel 3

## Die Kalibration des VLQ-Kalorimeters

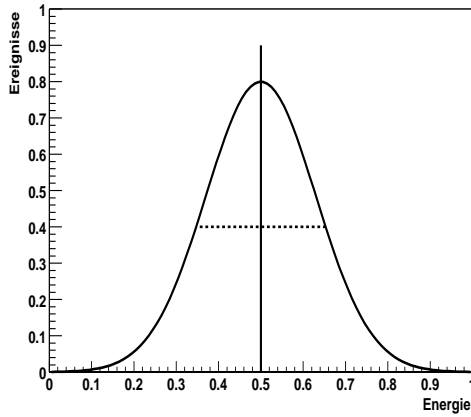
### 3.1 Grundlagen der Kalibration

Um mit einem Kalorimeter die Energie eines einlaufenden Teilchens messen zu können, sollte dieses Teilchen möglichst vollständig im Kalorimeter absorbiert werden. Das vom Kalorimeter gelieferte Signal  $S$  ist dann proportional zur ursprünglichen Energie  $E$  des Teilchens. Es gilt die Beziehung  $E = K \cdot S$ . Die Proportionalitätskonstante  $K$  wird dabei als Kalibrationskonstante bezeichnet. Um diese Kalibrationskonstante zu bestimmen, ist die Kenntnis einer absoluten Energieskala erforderlich, d.h. man muß die zum Signalwert  $S$  gehörende Energie  $E$  des einlaufenden Teilchens kennen. Die Prozedur zur Bestimmung der Kalibrationskonstanten wird als Kalibration bezeichnet.

Wurde für ein Kalorimeter eine Kalibration durchgeführt, so kann man nach der Kalibration über zwei Größen, die für das Kalorimeter bzw. die Kalibration desselben charakteristisch sind, eine Aussage treffen: die Auflösung des Kalorimeters bzw. die Güte der Kalibration. Diese beiden Größen sind grundlegend verschieden. Die mit einem Kalorimeter gemessenen Energien für Teilchen einer bestimmten Energie  $E$  sind im Idealfall um einen Mittelwert gaußverteilt, wobei die Breite der Verteilung durch die Standardabweichung der Gaußverteilung gegeben wird. Die Auflösung des Kalorimeters wird durch die Breite der Verteilung gegeben. Die Güte der Kalibration dagegen läßt sich daran erkennen, wie genau der Mittelwert der Verteilung nach der Kalibration mit der ursprünglichen Energie der Teilchen übereinstimmt.

In Abbildung 3.1 wird der Unterschied zwischen den beiden charakteristischen Größen deutlich. In dieser Abbildung sind die nach der Kalibration gemessenen Energieverteilungen für zwei verschiedene Fälle dargestellt. Im ersten Fall (Teil (a) der Abbildung) liegt der Mittelwert der gemessenen Verteilung genau bei der ursprünglichen Energie (durchgezogene Linie) der Teilchen, was zeigt, daß das Kalorimeter hier gut kalibriert wurde. Die Auflösung jedoch, die sich aus der Breite (gestrichelte Linie) der Verteilung ergibt, ist nicht so gut wie im zweiten Fall (Teil (b)). Hier liegt der Mittelwert der Verteilung zwar nicht bei der ursprünglichen Energie, was auf eine ungenaue Kalibration hindeutet, doch hat das Kalorimeter

(a)



(b)

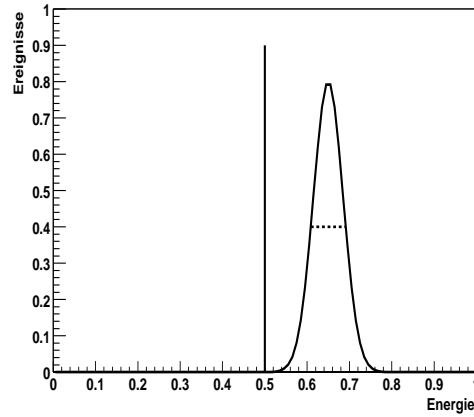


Abbildung 3.1: Unterschied zwischen der Auflösung eines Kalorimeters und der Güte der Kalibration: (a) exakte Kalibration bei schlechter Auflösung; (b) ungenaue Kalibration bei guter Auflösung.

eine gute Auflösung.

Die Aufgabe bei der Kalibration des VLQ-Kalorimeters ist es nun, eine Übereinstimmung des Mittelwertes der gemessenen Energieverteilung mit der ursprünglichen Energie der Teilchen zu erreichen. Aus der Energieverteilung, die sich nach der Kalibration ergibt, kann dann eine Aussage über die Auflösung des Kalorimeters getroffen werden.

Die Kalibration des VLQ-Kalorimeters wird in zwei Schritten durchgeführt: Im ersten Schritt werden die einzelnen Auslesekkanäle des Kalorimeters gegeneinander abgeglichen, d.h. es wird für jeden Kanal ein Kanalkalibrationsfaktor bestimmt, so daß alle Kanäle bei gleichen Eingangssignalen auch gleiche Ausgangssignale liefern. Im zweiten Schritt der Kalibration werden dann ortsabhängige absolute Kalibrationsfaktoren bestimmt, mit denen die rekonstruierten Cluster-Energien je nach Lage des rekonstruierten Cluster-Ortes multipliziert werden müssen. Diese absoluten Faktoren werden mit Hilfe einer Methode bestimmt, in der der kinematische Peak verwendet wird.

## 3.2 Der kinematische Peak

Die Kalibration der absoluten Energieskala des VLQ-Kalorimeters kann mit Hilfe des kinematischen Peaks durchgeführt werden. Dieser Peak im Energiespektrum des gestreuten Elektrons stellt eine Besonderheit der tiefinelastischen Elektron-Proton-Streuung dar.

Die Entstehung des kinematischen Peaks läßt sich mit Hilfe der kinematischen Ebene, die von den Variablen  $Q^2$  und  $x$  aufgespannt wird, erklären (siehe Abbildung 1.3). Betrachtet man die Linien konstanter Energien des gestreuten Elektrons, so

fällt auf, daß nur eine isoenergetische Linie parallel zur  $Q^2$ -Achse existiert. Diese Linie liegt bei  $x \approx 0.03$ . Wenn man nun diesen Wert der Bjorkenschen Skalenvariablen  $x$  mit der Protonstrahlenergie von 920 GeV multipliziert, so ergibt sich für das gestreute Quark genau die Elektronstrahlenergie. Projiziert man den Winkelakzeptanzbereich des VLQ-Spektrometers, der zwischen  $177.3^\circ$  und  $179.4^\circ$  liegt, auf die Energieachse des gestreuten Elektrons, so führt dies zu einer Erhöhung im Bereich der Elektronstrahlenergie. Diese Erhöhung wird als kinematischer Peak bezeichnet.

Mit Hilfe der Bjorkenschen Skalenvariablen  $x$ , die den Impulsanteil des gestreuten Quarks am Gesamtprotonimpuls angibt, läßt sich der kinematische Peak stark vereinfacht folgendermaßen erklären: Bei einem  $x$ -Wert von  $x \approx 0.03$  sind der Elektron- und der Quarkimpuls annähernd gleich, so daß das H1-Laborsystem und das Elektron-Quark-Schwerpunktsystem identisch sind. Man kann dann die Elektron-Proton-Wechselwirkung als quasi-elastische Elektron-Quark-Streuung im Laborsystem deuten und somit den kinematischen Peak erklären. Wenn man die kinematische Ebene genauer betrachtet, so sieht man, daß auch für andere  $x$ -Werte, die in einem Bereich um  $x \approx 0.03$  liegen, die Energie des gestreuten Elektrons in der Nähe der Elektronstrahlenergie liegt und somit auch diese  $x$ -Werte zum kinematischen Peak beitragen.

## 3.3 Die Ereignisselektion

### 3.3.1 Die Vorselektion

Die Daten, die zur Kalibration des VLQ-Kalorimeters verwendet werden, stammen aus der Datennahmeperiode 99-1. Diese Daten wurden von Februar bis April 1999 genommen. Dabei wurden die Ereignisse mit dem L1-Subtrigger "S 46" selektiert. Dieser fordert, daß entweder im oberen oder im unteren Modul folgendes gegeben sein muß: Die im Modul deponierte Energie muß über der HIGH-Schwelle (10 GeV) liegen, und es darf sich um kein reines Single-Diode-Ereignis handeln, d.h. es muß mindestens ein Cluster vorhanden sein.

Eine weitere Vorselektion wird mit Hilfe des VLQ-Rekonstruktionsprogrammes vorgenommen. Dieses Programm berechnet die Energien und Schwerpunkte der Cluster, die im Kalorimeter identifiziert werden. Die Ereignisse werden verschiedenen Ereignistypen zugeordnet, die sich z.B. durch eine unterschiedliche Anzahl von gefundenen Clustern oder das eventuelle Vorhandensein von Single-Diode-Kanälen unterscheiden. Die Ereignisse, die für die Kalibration benutzt werden, gehören den sogenannten Ereignistypen 1 und 2 an. Der Ereignistyp 1 bezeichnet Ereignisse, bei denen genau ein Cluster rekonstruiert wird und kein Single-Diode-Kanal vorhanden ist. Ereignisse, bei denen ebenfalls genau ein Cluster rekonstruiert aber zusätzlich ein Single-Diode-Kanal identifiziert wird, dieser aber nicht zur Energie- bzw. Schwerpunktsberechnung des Clusters herangezogen wird, werden dem Ereignistyp 2 zugeordnet.

Durch diese Vorselektion wurden insgesamt 316304 Ereignisse selektiert. In Abbildung 3.2 ist die Verteilung der rekonstruierten Cluster-Energien dargestellt. Diese Energieverteilung wurde mit einem vorkalibrierten Kalorimeter ermittelt, da die

Energien der Cluster mit dem VLQ-Rekonstruktionsprogramm berechnet wurden. In diesem werden für die Kalorimeterkanäle neben den aus dem Teststrahl ermittel-

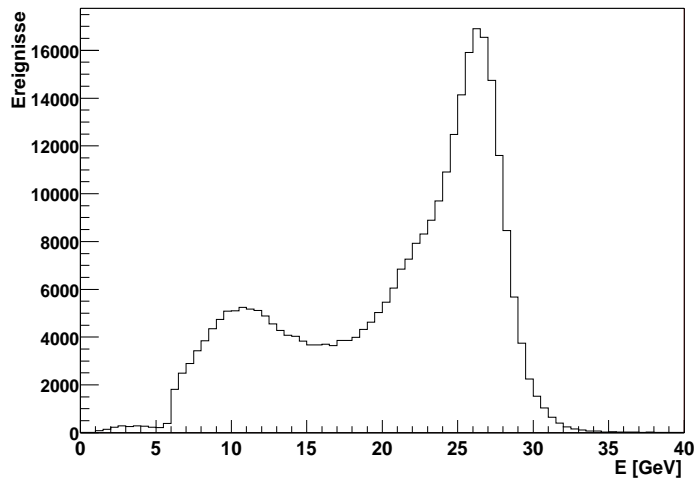


Abbildung 3.2: Die Verteilung der rekonstruierten Cluster-Energien der 316304 vorselektierten Ereignisse.

ten Kalibrationsfaktoren zusätzlich noch Faktoren aus einer vorläufigen Kalibration verwendet. In der Abbildung ist der im vorherigen Abschnitt beschriebene kinematische Peak deutlich zu erkennen. Das Maximum des Peaks liegt aber nicht bei der nominellen Elektronstrahlenergie von 27.56 GeV, sondern etwas darunter. Diese geringere Energie des Peaks hat mehrere Ursachen: Die Kanalkalibrationsfaktoren aus dem Teststrahl wurden mit Hilfe von Elektronen ermittelt, deren Energien zwischen 1 GeV und 6 GeV lagen. Für Energien, die im Bereich der Elektronstrahlenergie liegen, können diese Faktoren nicht mehr richtig sein, und es müssten andere Kanalfaktoren verwendet werden. Weitere Gründe für die geringere Energie sind zum einen beschädigte Kalorimeterkanäle, zum anderen die Tatsache, daß Teile des Schauers aus dem Kalorimeter entweichen können. Nach der Kalibration des Kalorimeters sollte das Maximum des kinematischen Peaks bei der Elektronstrahlenergie liegen.

Die Verteilung der Cluster-Energie in Abbildung 3.2 ist eine Überlagerung von Elektronen des kinematischen Peaks und Untergrund aus der Photoproduktion, z.B. Photonen aus  $\pi^0$ - und  $\eta$ -Zerfällen und Hadronen. Diese Untergrundereignisse, deren Anzahl mit kleiner werdender Energie steigt, überlagern die linke abfallende Flanke des kinematischen Peaks. Durch die Triggerschwelle wird dieses Ansteigen der Untergrundereignisse für kleinere Energien verhindert, und es ergibt sich die in der Abbildung sichtbare kleiner werdende Anzahl solcher Ereignisse. Die rechte abfallende Flanke des kinematischen Peaks ist durch die Auflösung des Detektors gegeben. Somit kann die Energieauflösung des VLQ-Kalorimeters bei einer bestimmten Energie durch einen Gauß-Fit an eben diese Flanke bestimmt werden.

### 3.3.2 Die angewandten Schnitte

Die Kalibration des VLQ-Kalorimeters wird mit Hilfe des kinematischen Peaks durchgeführt. Es sollen also nur solche Ereignisse verwendet werden, die Ereignisse aus diesem Peak sind. Durch geeignete Schnitte auf bestimmte Variablen der Ereignisse müssen also nun aus dem vorselektierten Datensample die Ereignisse des kinematischen Peaks selektiert werden.

#### Schnitt auf die Variable $y_{JB}$

Die kinematische Variable  $y$  der Elektron-Proton-Streuung läßt sich, wie in Gleichung 1.14 zu sehen ist, mit Hilfe der Energie  $E'_e$  und dem Ablenkwinkel  $\vartheta_e$  des gestreuten Elektrons rekonstruieren. Neben dieser Methode gibt es noch die Methode von Jacquet-Blondel [7], in der zur Rekonstruktion von  $y$  nur der hadronische Endzustand verwendet wird:

$$y_{JB} = \frac{\sum_h (E_h - p_{h,z})}{2E_e}, \quad (3.1)$$

wobei sich die Summe  $\sum_h$  über alle Teilchen des hadronischen Endzustandes erstreckt. Für die Kalibration werden nur solche Ereignisse selektiert, bei denen die Variable  $y_{JB}$  die Bedingung

$$y_{JB} < 0.04 \quad (3.2)$$

erfüllt. Dieser Schnitt fordert also, daß im zentralen Bereich des H1-Detektors nur minimale hadronische Aktivität vorhanden ist. Der Schnitt auf die Variable  $y_{JB}$  wird verwendet, da das VLQ-Kalorimeter bei kleinen Werten von  $Q^2$  mißt, und für solche Werte der Hauptteil des hadronischen Endzustandes sich in Protonflugrichtung weiterbewegt und somit aus dem Detektor entweicht.

#### Schnitt auf den Cluster-Radius

Für jedes der vorselektierten Ereignisse wird der Radius des Clusters im Kalorimeter mit Hilfe des Rekonstruktionsprogrammes berechnet. Die Verteilung dieser Cluster-Radien ist in Abbildung 3.3 zu sehen. Der Cluster-Radius ist dabei in Einheiten von Wellenlängenschiebern (WLS) angegeben, wobei eine WLS-Einheit einer Länge von 5 mm entspricht. Für die selektierten Kalibrationsereignisse wird gefordert, daß der Cluster-Radius im Bereich

$$0.7 \text{ WLS} \leq \text{Cluster-Radius} \leq 1.0 \text{ WLS} \quad (3.3)$$

liegt. Durch diesen Schnitt soll hadronischer Untergrund unterdrückt werden.

#### Schnitt auf die Cluster-Energie

Der letzte Schnitt, der angewendet wird, um Ereignisse des kinematischen Peaks zu selektieren, ist ein Schnitt auf die Cluster-Energie. Es werden nur solche Ereignisse selektiert, die die Bedingung

$$\text{Cluster-Energie} > 20 \text{ GeV} \quad (3.4)$$

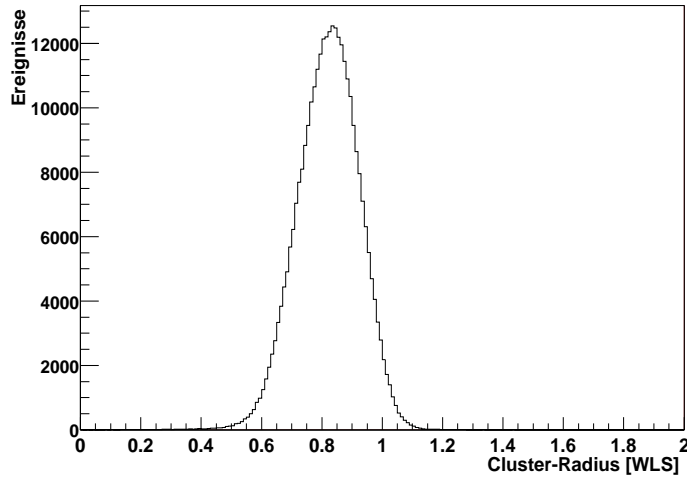


Abbildung 3.3: Die Verteilung der Cluster-Radien der vorselektierten Ereignisse.

erfüllen.

Wendet man nun diese drei Schnitte auf das vorselektierte Datensample an, so verbleiben noch 144572 Ereignisse. Die Verteilung der Cluster-Energien dieser Ereignisse ist in Abbildung 3.4 dargestellt. Da im folgenden davon ausgegangen wird, daß alle diese selektierten Ereignisse aus dem kinematischen Peak stammen, also eine ursprüngliche Energie von 27.56 GeV haben, kann mit Hilfe dieser Ereignisse das VLQ-Kalorimeter kalibriert werden.

### 3.4 Die Interkalibration der Auslesekanäle

Die einzelnen Auslesekanäle des VLQ-Kalorimeters sollten, wenn sie von Elektronen einer bestimmten Energie getroffen werden, auch gleiche Ausgangssignale liefern. Durch verschiedene Effekte, die zwischen der Entstehung des Lichtes in den Szintillatoren und dem letztlich gemessenen Ausgangssignal des einzelnen Kanals auftreten, ist die Gleichheit der Ausgangssignale nicht gewährleistet. In den Szintillatoren und in den Wellenlängenschiebern kann es vorkommen, daß durch optischen Kontakt das Licht nicht im Szintillator bzw. Wellenlängenschieber verbleibt, sondern in die Nachbarszintillatoren bzw. -wellenlängenschieber gelangt. Dieser Effekt wird als Übersprechen bezeichnet.

Ein anderer Effekt ist das Übersprechen zwischen den Photodioden. Dieses Übersprechen kommt dadurch zustande, daß durch den zwischen den Wellenlängenschiebern und den Photodioden bestehenden Abstand das Licht aus einem Wellenlängenschieber nicht in die entsprechende Photodiode, sondern in eine Nachbarphotodiode gelangt und dort ein Signal auslöst. Bei einer Messung dieses Übersprechens zwischen den Photodioden wurde festgestellt, daß in jedem der beiden Nachbarakanäle eines bestimmten Kanals ein Signal erzeugt wird, dessen Amplitude ca.

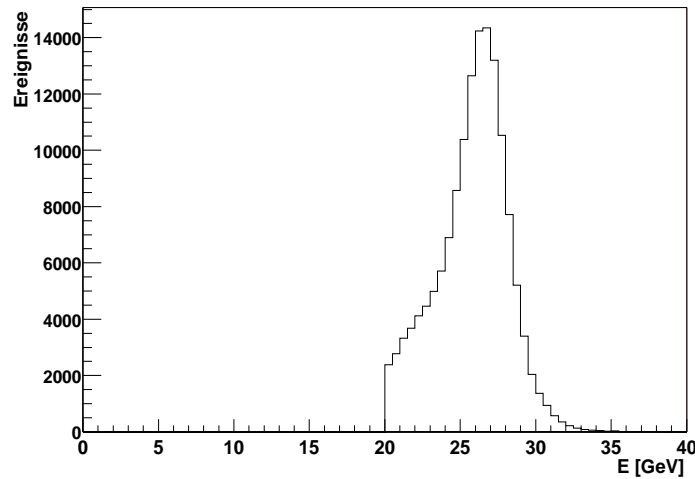


Abbildung 3.4: Die Verteilung der Cluster-Energie der 144572 Ereignisse, die für die Kalibration des VLQ-Kalorimeters selektiert wurden.

10% der Amplitude des Signals dieses Kanals beträgt [6]. Der Effekt des Übersprechens kann aber durch Montagetoleranzen für verschiedene Kanäle unterschiedlich groß sein. Schließlich tragen auch noch Bauteiltoleranzen in der Ausleseelektronik zu den nichtidentischen Ausgangssignalen bei gleichen Eingangssignalen der Kanäle bei, aber nicht in dem Maße wie z.B. das Übersprechen zwischen den Photodioden.

Wenn man die Ausgangssignale der einzelnen Kanäle für gleiche Eingangssignale mißt, dann kann man aus dieser Messung für jeden Kanal einen Kalibrationsfaktor bestimmen. Durch Multiplikation dieses Faktors mit dem Ausgangssignal des entsprechenden Kanals wird erreicht, daß die Werte der Ausgangssignale aller Kanäle bei gleichen Eingangssignalen identisch sind. Dieses Abgleichen der Auslesekanäle wird als Interkalibration bezeichnet.

Der Abgleich der Auslesekanäle wird für jedes der vier Arrays eines Kalorimetermoduls separat durchgeführt. Dies liegt daran, daß die beiden horizontalen Arrays jedes Moduls die vertikal orientierten Szintillatorlagen, die beiden vertikalen Arrays die horizontal orientierten Szintillatorlagen auslesen. Da diese horizontalen und vertikalen Szintillatorlagen unabhängig voneinander sind, können sie somit getrennt voneinander kalibriert werden. Da bei der absoluten Kalibration für die Energie- und Ortsrekonstruktion der ins VLQ-Kalorimeter einlaufenden Elektronen jeweils die Kanäle eines Arrays zunächst für sich betrachtet werden, ist es nur wichtig, daß die Kanäle eines Arrays untereinander abgeglichen werden.

### 3.4.1 Methode zur Bestimmung der Kanalfaktoren

Die Bestimmung der Kalibrationsfaktoren für jeden Kanal eines Arrays wird in zwei Schritten durchgeführt: Im ersten Schritt wird nur der jeweilige Kanal für sich betrachtet, ohne die Nachbarkanäle miteinzubeziehen. Der in diesem ersten

Schritt bestimmte Kalibrationsfaktor korrigiert somit das Übersprechen zwischen den Szintillatoren und den Wellenlängenschiebern sowie mögliche Unterschiede in der Ausleseelektronik zwischen den einzelnen Kanälen. Im zweiten Schritt werden dann auch die Nachbarkanäle des jeweiligen Kanals berücksichtigt, um auch noch den Effekt des Übersprechens zwischen den Photodioden zu korrigieren.

### Erster Teil der Kanalfaktorbestimmung

Zunächst wird für jedes Ereignis der Kanal ermittelt, auf dem das Elektron aufgetroffen ist. Dies geschieht, indem der Kanal mit dem maximalen Signal im Array bestimmt wird. Diese Energie wird dann in ein diesem Kanal zugeordnetes Histogramm eingetragen, und aus den Histogrammen aller Kanäle eines Arrays können dann die vorläufigen Kalibrationsfaktoren für die einzelnen Kanäle bestimmt werden. Um die Faktoren korrekt bestimmen zu können, müssen die in die Kanalhistogramme gefüllten Energiewerte auch tatsächlich von den gestreuten Elektronen herrühren, es müssen also bestimmte Voraussetzungen erfüllt sein. Dabei unterscheiden sich die gestellten Bedingungen je nach dem, welches der vier verschiedenen Arrays eines Kalorimetermoduls kalibriert werden soll. Die verschiedenen Bedingungen werden im folgenden beschrieben.

In Abbildung 3.5 ist ein mit dem VLQ-Kalorimeter gemessenes Ereignis eines Elektrons mit einer Energie von 4 GeV dargestellt. Bei diesem Ereignis handelt es sich um ein in Abschnitt 2.2.2 beschriebenes Single-Diode-Ereignis. Im unteren

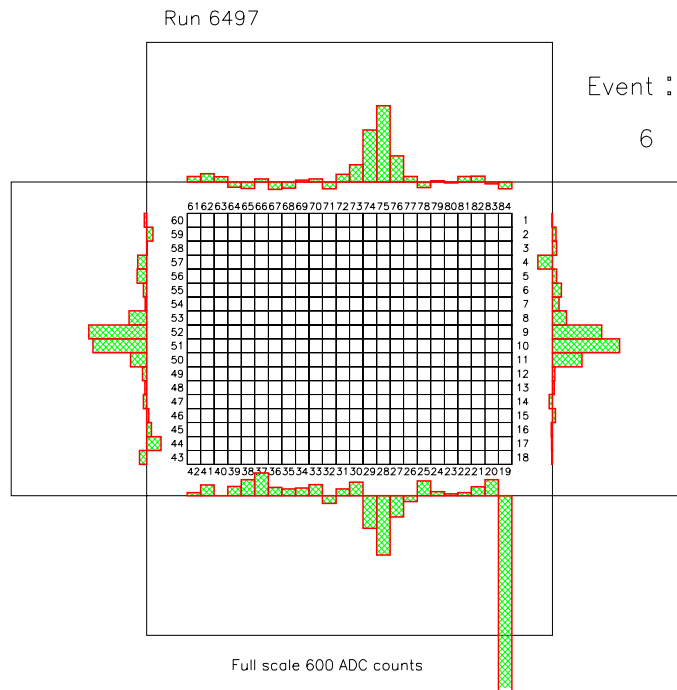


Abbildung 3.5: Eventdisplay eines Ereignisses eines Elektrons mit einer Energie von 4 GeV. Im unteren horizontalen Array ist ein Single-Diode-Kanal zu sehen [6].



horizontalen Array ist deutlich ein Single-Diode-Kanal zu erkennen (Kanal Nr.19). Das Signal in diesem Kanal wurde aber nicht durch den vom Elektron ausgelösten Schauer, sondern von einem geladenen Teilchen direkt in der Photodiode erzeugt. Demnach ist in diesem Array der Auftreffkanal nicht mit dem Kanal identisch, der das größte Signal aufweist. Um zu verhindern, daß die Energien von Single-Diode-Kanälen in die Histogramme zur Bestimmung der Kalibrationsfaktoren eingehen, wird ausgenutzt, daß mit dem VLQ-Kalorimeter jeweils zwei Projektionen des Schauerprofils in  $x$ - und  $y$ -Richtung gemessen werden. Wenn das Elektron genau in der Mitte zweier Kanäle auftrifft, kann es durch das Rauschen passieren, daß die beiden maximalen Kanäle zweier gegenüberliegender Arrays nicht im gleichen also genau gegenüberliegenden Kanal liegen, sondern um einen Kanal verschoben sind (Kanäle Nr.10 und 52).

Es wird also das maximale Signal eines Kanals nur dann in das Histogramm eingetragen, wenn der maximale Kanal im gegenüberliegenden Array entweder genau der gegenüberliegende Kanal oder einer der beiden Kanäle links und rechts dieses Kanals ist.

Durch diese Forderung werden aber beide maximalen Kanäle gegenüberliegender Arrays, in denen nur ein Single-Diode-Kanal enthalten ist, nicht in die entsprechenden Histogramme eingetragen, da beide Kanäle diese Bedingung nicht erfüllen. Dies kann anhand des Ereignisses, das in Abbildung 3.5 gezeigt ist, erklärt werden: Die beiden maximalen Kanäle in den horizontalen Arrays sind die Kanäle 75 bzw. 19. Dabei ist Kanal 19 hier ein Single-Diode-Kanal. Für beide Kanäle befindet sich der maximale Kanal im gegenüberliegenden Array nicht in einem der drei geforderten Kanäle. Da das Signal in Kanal 75 durch den Schauer des Elektrons erzeugt wurde, kann die Energie dieses Kanals zur Kalibration verwendet werden.

Um den maximalen Kanal 75 im oberen horizontalen Array zu "retten", d.h. ihn doch noch in das entsprechende Histogramm einzutragen, wird deshalb die gestellte Forderung leicht modifiziert. Bei der mit dem VLQ-Rekonstruktionsprogramm durchgeführten Berechnung der Cluster-Energie und des Cluster-Ortes im Kalorimeter können Single-Diode-Kanäle identifiziert werden und gehen deshalb nicht in diese Berechnungen mit ein. Mit Hilfe der Position des rekonstruierten Clusters kann deshalb obige Forderung modifiziert werden. Um den rekonstruierten Auftreffpunkt wird in horizontaler und vertikaler Richtung ein Streifen von jeweils drei Kanälen zu beiden Seiten gelegt. Die beiden so erhaltenen Streifen haben also jeweils eine Breite von sechs Kanälen. Der maximale Kanal 75 im oberen horizontalen Array kann also "gerettet" werden, wenn gefordert wird, daß sich der maximale Kanal im jeweiligen Streifen um den rekonstruierten Auftreffpunkt befindet. Der Single-Diode-Kanal Nr.19 wird durch diese Forderung abgelehnt, also nicht in das entsprechende Histogramm eingetragen.

Somit lautet also die erste Voraussetzung, die ein maximaler Kanal in einem Array erfüllen muß, damit dessen Energie in das ihm zugeordnete Histogramm eingetragen wird:

- der maximale Kanal im gegenüberliegenden Array muß genau der gegenüberliegende Kanal oder einer der beiden Kanäle links und rechts dieses Kanals sein

## ODER

- der maximale Kanal selbst muß in einem Streifen von sechs Kanälen (in jede Richtung drei Kanäle) um den rekonstruierten Auftreffpunkt liegen.

Die zweite Forderung, die gestellt wird, betrifft in jedem Kalorimetermodul nur jeweils das horizontale Array, das am nächsten am Strahlrohr liegt.

In Abschnitt 2.2.1 wurde der Effekt der Abschwächung des Szintillatorlichtes in den Szintillatorstäben beschrieben. Demnach steigt die relative Lichtausbeute in den Szintillatoren stark an, wenn der Abstand zwischen dem Entstehungsort des Lichtes und der Auslesefläche kleiner als ca. 10 mm wird (siehe Abbildung 2.2). Demnach liefern die einzelnen Kanäle auch im Verhältnis zu hohe Energien, wenn sich der Auftreffpunkt des gestreuten Elektrons zu nahe am Rand des Kalorimeters befindet. Da die aus den Elektron-Proton-Wechselwirkungen stammenden gestreuten Elektronen radialsymmetrisch um die Strahlröhre gestreut werden und die Häufigkeit dieser Elektronen wegen der  $\frac{1}{Q^4}$ -Abhängigkeit des Wirkungsquerschnittes nach außen hin abnimmt, liegen viele der Auftreffpunkte in der Nähe der beiden horizontalen Arrays, die am nächsten am Strahlrohr liegen. Für diese beiden Arrays muß also zusätzlich gefordert werden, daß der Auftreffpunkt der Elektronen einen gewissen Mindestabstand von diesen Arrays hat. Dies ist gegeben, wenn gefordert wird, daß sich keines der beiden Maxima der vertikalen Arrays in einem der zwei Kanäle befindet, die am nächsten am Strahlrohr liegen.

Die zweite Voraussetzung, die ein maximaler Kanal in einem der beiden horizontalen, am nächsten zur Strahlröhre liegenden Arrays erfüllen muß, damit seine Energie in das entsprechende Histogramm eingetragen wird, lautet somit:

- keines der beiden Maxima in den vertikalen Arrays darf sich in einem der zwei Kanäle des Kalorimetermoduls befinden, die am nächsten am Strahlrohr liegen.

Sind also die jeweiligen Bedingungen erfüllt, so wird die Energie des maximalen Kanals jedes Arrays in ein diesem Kanal zugeordnetes Histogramm gefüllt. Dies wird für jedes der 144572 selektierten Ereignisse durchgeführt. Man erhält somit für jeden Kanal des Kalorimeters ein Histogramm, in dem die Energieverteilung für diesen Kanal zu sehen ist. Wie bereits erwähnt, können aus diesen Histogrammen nun die Kalibrationsfaktoren durch einen iterativen Prozeß bestimmt werden. Das bedeutet, daß in einem ersten Durchgang ("Iteration") für jeden Kanal ein Kalibrationsfaktor bestimmt wird. In einer zweiten Iteration werden die Energien in den einzelnen Kanälen mit den entsprechenden Kanalfaktoren multipliziert und die nachfolgend beschriebene Prozedur zur Bestimmung der Faktoren erneut durchgeführt, wobei der Kanalfaktor nach der zweiten Iteration das Produkt aus den in der ersten und zweiten Iteration ermittelten Faktoren ist. Der Faktor des ersten Teils der Kalibrationsfaktorbestimmung ergibt sich somit aus dem Produkt aller in den einzelnen Iterationen ermittelten Faktoren.

Im folgenden wird die Methode beschrieben, wie die Kalibrationsfaktoren ermittelt werden. In der ersten Iteration wird zunächst aus den Mittelwerten der

Kanalhistogramme eines Arrays ein globaler Mittelwert  $M^{(1)}$  bestimmt, der durch

$$M^{(1)} = \frac{\sum_{i, N_i^{(1)} \geq N_1} m_i^{(1)}}{n^{(1)}} \quad (3.5)$$

gegeben ist. Der hochgestellte Index (1) steht für die Nummer der Iteration. Die Variable  $m_i^{(1)}$  ist der Mittelwert des Histogramms von Kanal  $i$ ,  $N_i^{(1)}$  die Anzahl der Einträge in diesem Histogramm,  $N_1$  eine positive ganze Zahl und  $n^{(1)}$  die Anzahl der in diesen Mittelwert eingehenden Kanäle. Es gehen also nur solche Kanäle in den globalen Mittelwert ein, bei denen die Anzahl der Histogrammeinträge  $N_i^{(1)}$  einen gewissen Schwellenwert  $N_1$  übersteigt, da nur dann ein verlässlicher Mittelwert gebildet werden kann, wenn genügend Statistik vorhanden ist. Der Kanalfaktor  $f_i^{(1)}$  der ersten Iteration für den Kanal  $i$  eines Arrays ergibt sich dann als

$$f_i^{(1)} = \frac{M^{(1)}}{m_i^{(1)}}. \quad (3.6)$$

Wenn die Anzahl der Einträge in einem Kanalhistogramm kleiner ist als  $N_1$ , dann wird der Faktor für diesen Kanal auf  $f_i = 1.0$  gesetzt. In der zweiten Iteration werden die Kanalenergien mit den für den jeweiligen Kanal bestimmten Faktor aus der ersten Iteration multipliziert. Der Faktor für den Kanal  $i$  nach dieser zweiten Iteration ergibt sich dann als Produkt aus dem Faktor der ersten Iteration  $f_i^{(1)}$  und dem in der zweiten Iteration ermittelten Faktor  $f_i^{(2)}$ :

$$f_i = f_i^{(1)} \cdot f_i^{(2)}. \quad (3.7)$$

Als globaler Mittelwert wird in jeder Iteration  $j$  für jedes Array der Wert  $M^{(1)}$  aus der ersten Iteration genommen. Dieser wurde ja aus den unkalibrierten Kanälen ermittelt. Durch Anwenden der Kalibrationsfaktoren auf die unkalibrierten Kanäle soll der Mittelwert jedes Kanalhistogramms auf eben diesen globalen Mittelwert "gezwungen" werden.

Als Ergebnis des ersten Teils der Kalibrationsfaktorbestimmung wird für jeden Kanal  $i$  der Faktor  $f_i$  gegeben durch

$$f_i = \prod_{j=0}^J f_i^{(j)}. \quad (3.8)$$

### Zweiter Teil der Kanalfaktorbestimmung

Wie bereits erwähnt, wird im zweiten Teil der Kalibrationsfaktorbestimmung zusätzlich noch der Effekt des Übersprechens zwischen den Photodioden korrigiert. Dadurch können sich die im ersten Teil ermittelten Faktoren  $f_i$  für alle Kanäle  $i$  des Kalorimeters noch ändern.

Zuerst werden die Kanalenergien aller Kanäle  $i$  mit den Faktoren  $f_i$  des ersten Teils multipliziert. Dann wird, wie im ersten Teil beschrieben, in jedem Array der

Kanal mit dem größten Signal bestimmt. Um das Übersprechen zwischen den Photodioden zu berücksichtigen, wird in die Kanalhistogramme jetzt nicht mehr nur die Energie des maximalen Kanals, sondern die Summe aus den Energien des maximalen Kanals und jeweils eines Kanals links und rechts des maximalen Kanals eingetragen. Da die beiden Randkanäle jedes Arrays nur jeweils einen direkten Nachbarkanal haben, wird, falls der maximale Kanal einer der beiden Randkanäle ist, die Summe aus der Energie des Randkanals und der zweifachen Energie des Nachbarkanals gebildet. Somit wird gewährleistet, daß die Randkanäle nicht systematisch unterdrückt sind.

Die Voraussetzungen, die für das Eintragen dieser Energiesumme in das dem maximalen Kanal zugeordneten Histogramm erfüllt sein müssen, sind identisch mit den Bedingungen, die im ersten Teil gestellt wurden. Der globale Mittelwert aller Kanalhistogramme eines Arrays wird wie in Gleichung 3.5 bestimmt, wobei auch hier nur solche Kanäle berücksichtigt werden, bei denen die Anzahl der Histogrammeinträge den Wert  $N_1$  übersteigt. Der Kalibrationsfaktor  $F_i^{(1)}$  für einen Kanal  $i$  ergibt sich dann als

$$F_i^{(1)} = \frac{M^{(1)}}{m_i^{(1)}}. \quad (3.9)$$

Für Kanäle mit weniger als  $N_1$  Einträgen in den Kanalhistogrammen wird auch hier der Faktor auf  $F_i = 1.0$  gesetzt. Die endgültigen Kalibrationsfaktoren werden, wie im ersten Teil, durch einen iterativen Prozeß bestimmt, wobei auch hier in jeder Iteration  $j$  die Kanalfaktoren  $F_i^{(j)}$  mit Hilfe des globalen Mittelwertes  $M^{(1)}$  ermittelt werden. Dabei wird der iterative Prozeß zur Faktorbestimmung abgebrochen, wenn sich die für einen Kanal ermittelten Kalibrationsfaktoren der aktuellen und vorigen Iteration um weniger als 0.5 % unterscheiden.

Die endgültigen Kalibrationsfaktoren für die einzelnen Kanäle  $i$  des Kalorimeters werden durch die Gleichung

$$F_i = \prod_{j=0}^{J_i} F_i^{(j)} \quad (3.10)$$

gegeben. Die Zahl  $J_i$  gibt die Anzahl der Iterationen an, die für den Kanal  $i$  benötigt werden, um die Abbruchbedingung zu erfüllen.

Der Gesamtfehler der Kalibrationsfaktoren setzt sich aus drei Beiträgen zusammen: Der erste Beitrag kommt vom Fehler der Abbruchbedingung, den zweiten Beitrag bildet der statistische Fehler bei der Bestimmung des Histogrammmittelwertes der letzten Iteration. Schließlich stellt der Fehler bei der Bildung des globalen Mittelwertes in der ersten Iteration den dritten Beitrag zum Fehler der Kalibrationsfaktoren dar. Der Fehler ergibt sich somit zu

$$\frac{\Delta F_i}{F_i} = \sqrt{(0.5\%)^2 + \left(\frac{\Delta m_i^{(J_i)}}{m_i^{(J_i)}}\right)^2 + \left(\frac{\Delta M^{(1)}}{M^{(1)}}\right)^2}. \quad (3.11)$$

Für die Kanäle, bei denen wegen zu geringer Statistik in den Energiehistogrammen der Faktor auf 1.0 gesetzt wurde, kann deshalb auch kein Fehler bestimmt werden.

### 3.4.2 Ergebnis der Kanalfaktorbestimmung

Im folgenden werden die Ergebnisse der Bestimmung der Kalibrationsfaktoren vorgestellt.

Im ersten Teil der Bestimmung der Kanalfaktoren werden für jeden Kanal 20 Iterationen durchgeführt. Dabei wird die Anzahl der Mindesteinträge  $N_1$  für die Kanalhistogramme auf  $N_1 = 30$  festgesetzt. Da bei den Kanälen 14, 15 und 16 jeweils die Klebung zwischen einer Photodiode und dem Wellenlängenschieber gebrochen ist, werden diese Kanäle bei der Bildung des globalen Mittelwertes des rechten vertikalen Arrays des oberen Moduls nicht berücksichtigt.

Im zweiten Teil der Kalibrationsfaktorbestimmung werden für jeden Kanal des Kalorimeters nur noch so viele Iterationen durchgeführt, bis die Abbruchbedingung erfüllt ist. Somit kann die Anzahl der Iterationen für die einzelnen Kanäle unterschiedlich sein. Wie im ersten Teil werden nur solche Kanäle bei der Bildung des globalen Mittelwertes in jedem Array berücksichtigt, die mindestens 30 Einträge im Energiehistogramm aufweisen. Da alle Kanäle als Startfaktor für die erste Iteration den Faktor aus dem ersten Teil bekommen und somit vorkalibriert sind, werden zur Bestimmung der endgültigen Kalibrationsfaktoren auch die beschädigten Kanäle berücksichtigt, falls sie die erforderliche Mindestanzahl von Histogrammeinträgen aufweisen.

In Abbildung 3.6 sind beispielhaft für die Kanäle 14 und 81 das Verhalten der Kalibrationsfaktoren während der iterativen Prozesse dargestellt. Es ist zu erkennen, daß die Faktoren im ersten Teil innerhalb weniger Iterationen einen Faktor erreichen, der sich dann in den folgenden Iterationen nicht mehr ändert. Im zweiten Teil der Faktorbestimmung ist zu erkennen, daß für Kanal 14 nur eine Iteration benötigt wird, um die Abbruchbedingung zu erfüllen. Für Kanal 81 werden dagegen sechs Iterationen zur Erfüllung der Abbruchbedingung benötigt.

Abbildung 3.7 zeigt die ermittelten Kalibrationsfaktoren und Fehler für alle Kanäle des VLQ-Kalorimeters. Da in den vertikalen Arrays (linke Spalte in Abbildung 3.7) des Kalorimeters nur die Kanäle, die nahe am Strahlrohr liegen, genügend Statistik in den Kanalhistogrammen enthalten, haben dort nur etwa die Hälfte aller Kanäle einen Kalibrationsfaktor ungleich 1.0. In den horizontalen Arrays (rechte Spalte in Abbildung 3.7) ist zu erkennen, daß dort die Randkanäle größere Faktoren haben als die Kanäle in der Mitte. Dies liegt an der Lichtabschwächung in den Szintillatoren. Wie zu sehen ist, sind die Kalibrationsfaktoren der beschädigten Kanäle 14, 15 und 16 deutlich größer als 1.0.

## 3.5 Die absolute Kalibration des VLQ-Kalorimeters

Durch die Kalibration des VLQ-Kalorimeters soll erreicht werden, daß die gemessene Energie der einfallenden Teilchen unabhängig vom Auftreffpunkt auf dem Kalorimeter ist. Für Teilchen gleicher Energien sollten also sowohl für Auftreffpunkte in der Mitte als auch am Rand des Kalorimeters die gleichen Energien rekonstruiert

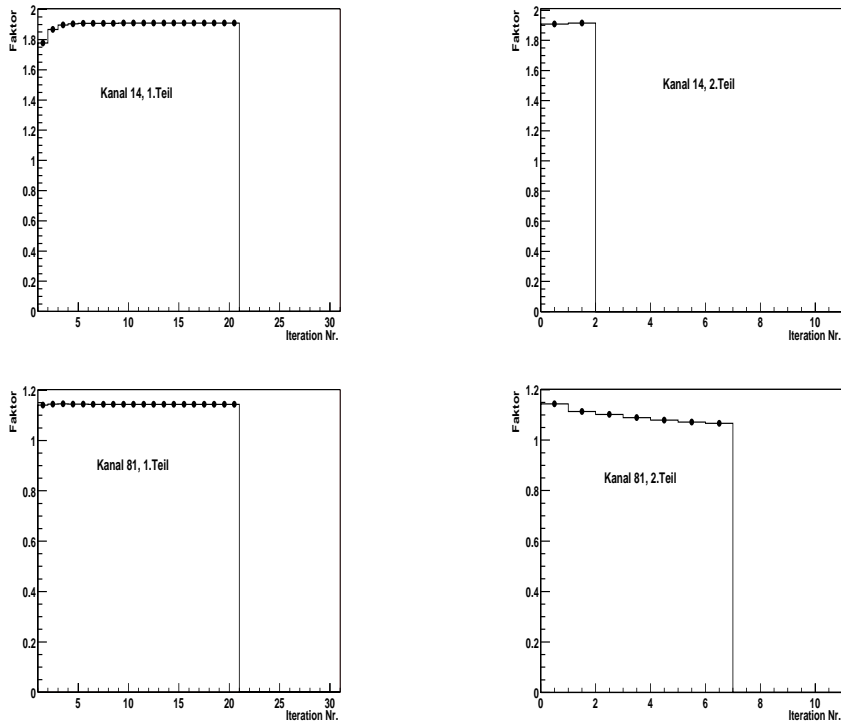


Abbildung 3.6: Verhalten der Kalibrationsfaktoren für die Kanäle 14 und 81 in beiden Teilen der Faktorbestimmung.

werden. Aber gerade bei Auftreffpunkten, die am Rand des Kalorimeters liegen, kommen zu den Energieverlusten in longitudinaler Richtung, die durch die endliche Länge des Kalorimeters verursacht werden, auch noch laterale Energieverluste hinzu, da Teile des Schauers seitlich aus dem Kalorimeter entweichen. Zusätzlich tragen noch die defekten Auslesekanäle dazu bei, daß die rekonstruierte Teilchenenergie doch davon abhängt, wo der Auftreffpunkt liegt.

Das Ziel der absoluten Kalibration des VLQ-Kalorimeters ist es, für jedes Modul ortsabhängige Kalibrationskonstanten zu bestimmen, mit deren Hilfe die Unabhängigkeit der mit dem Kalorimeter gemessenen Energie vom Auftreffpunkt erreicht wird. Dabei sollen die Kalibrationsfaktoren die ganze Fläche des Kalorimeters abdecken, das heißt, daß die Flächen der beiden Module in Kästchen einer bestimmten Kantenlänge unterteilt werden und für jedes dieser Kästchen ein Faktor bestimmt wird. Die ursprüngliche Energie eines einlaufenden Teilchens wird dann ermittelt, indem zuerst mit Hilfe der Kanalfaktoren der Auftreffpunkt und die Energie des Teilchens rekonstruiert werden und diese Energie dann schließlich mit dem zum Auftreffpunkt gehörenden absoluten Kalibrationsfaktor multipliziert wird.

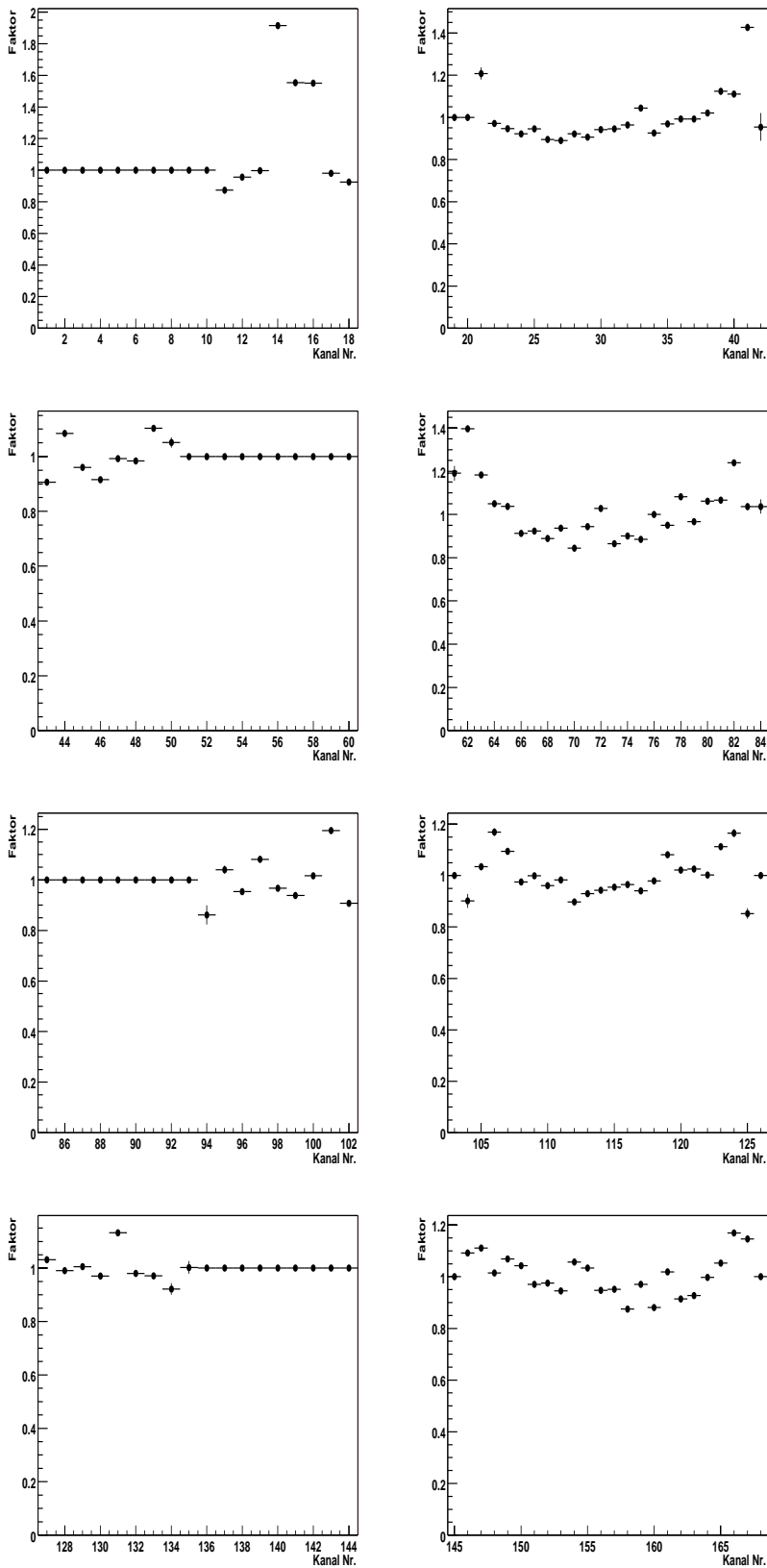


Abbildung 3.7: Alle ermittelten Kanalfaktoren für das VLQ-Kalorimeter.

### 3.5.1 Methode zur Bestimmung der Kalibrationsfaktoren

Um die absoluten Kalibrationsfaktoren zu bestimmen, wird zuerst über jedes Kalorimetermodul ein Gitter gelegt. Die Fläche jedes Moduls wird also in Kästchen einer bestimmten Länge und Breite unterteilt. Da die Ortsauflösung des VLQ-Kalorimeters für Teilchen ab einer Energie von ca. 5 GeV besser als 1 mm wird, wird die Bestimmung der absoluten Kalibrationsfaktoren mit einer Feinheit von 1 mm durchgeführt, das heißt, daß als Kantenlänge für die Kästchen eine Länge von 1 mm gewählt wird. Da die beiden Module je eine aktive Fläche von 124 mm Breite und 94 mm Höhe haben, werden pro Modul somit 11656 Kalibrationsfaktoren bestimmt.

Für jedes der Ereignisse, die für die Kalibration selektiert wurden, wird zunächst die Energie und der Auftreffpunkt auf das Kalorimeter (siehe Abschnitt 2.2.4) bestimmt. Um die Energie zu rekonstruieren, wird zuerst die Energie jedes Auslesekanals mit dem für diesen Kanal ermittelten Kalibrationsfaktor multipliziert. Dann wird in jedem Array des jeweiligen Moduls die Summe aus der Energie des maximalen Kanals und vier Kanälen zur rechten und linken Seite gebildet. Die Energie des Elektrons ergibt sich dann aus der Summe der vier Energiesummen der einzelnen Arrays. Bei der Bestimmung des Auftreffpunktes werden ebenfalls in jedem Array der maximale Kanal und vier Nachbarkanäle zu beiden Seiten berücksichtigt, wobei der Auftreffpunkt mit der in Abschnitt 2.2.4 beschriebenen logarithmischen Gewichtung berechnet wird. Die rekonstruierte Energie wird nun in ein Histogramm gefüllt, das dem Kästchen zugeordnet ist, in dem sich der rekonstruierte Auftreffpunkt befindet. Um Single-Diode-Ereignisse zu verwerfen, wird gefordert, daß sich die maximalen Kanäle in gegenüberliegenden Arrays für alle vier Arrays eines Moduls genau im gleichen Kanal oder in einem der beiden Kanäle links und rechts davon befinden. Nur wenn diese Bedingung erfüllt ist, wird die Energie in das Histogramm des entsprechenden Kästchens eingetragen.

Diese Prozedur wird für alle selektierten Ereignisse durchgeführt. Da von allen selektierten Ereignissen angenommen wird, daß sie Ereignisse aus dem kinematischen Peak sind, ergibt sich der Kalibrationsfaktor für das Kästchen mit Nummer  $i$  in  $x$ -,  $j$  in  $y$ -Richtung zu

$$A_{i,j} = \frac{27.56 \text{ GeV}}{m_{i,j}}, \quad (3.12)$$

wobei  $m_{i,j}$  der Mittelwert des Energiehistogramms des entsprechenden Kästchens ist. Um einen sinnvollen Faktor für ein Kästchen zu bestimmen, muß die Anzahl der Einträge  $N_{i,j}$  in dessen Energiehistogramm eine bestimmte Anzahl  $N_2$  überschreiten. Diese Zahl  $N_2$  wurde auf 10 festgelegt. Der Fehler des ermittelten Faktors ergibt sich aus dem statistischen Fehler bei der Bildung des Histogrammmittelwertes  $m_{i,j}$  zu

$$\Delta A_{i,j} = \frac{27.56 \text{ GeV}}{m_{i,j}^2} \cdot \Delta m_{i,j}. \quad (3.13)$$

In Abbildung 3.8 ist für jedes der beiden Module der Bereich dargestellt, in dem die Kästchen mehr als 10 Einträge haben. Wie zu sehen ist, wurde für jedes der beiden Module ein eigenes Koordinatensystem gewählt. Die Richtungen der  $x$ - und



$y$ -Achsen sind mit denen des H1-Koordinatensystems identisch, nur der Ursprung wurde hier jeweils in die linke untere Ecke jedes Moduls gelegt. Die negative  $z$ -Achse, also die Elektronflugrichtung, zeigt in die Zeichenebene hinein, so daß sich der Kanal 1 auf der rechten Seite des oberen Moduls am oberen Rand, der Kanal 85 auf der linken Seite des unteren Moduls am unteren Rand befindet. Es ist zu

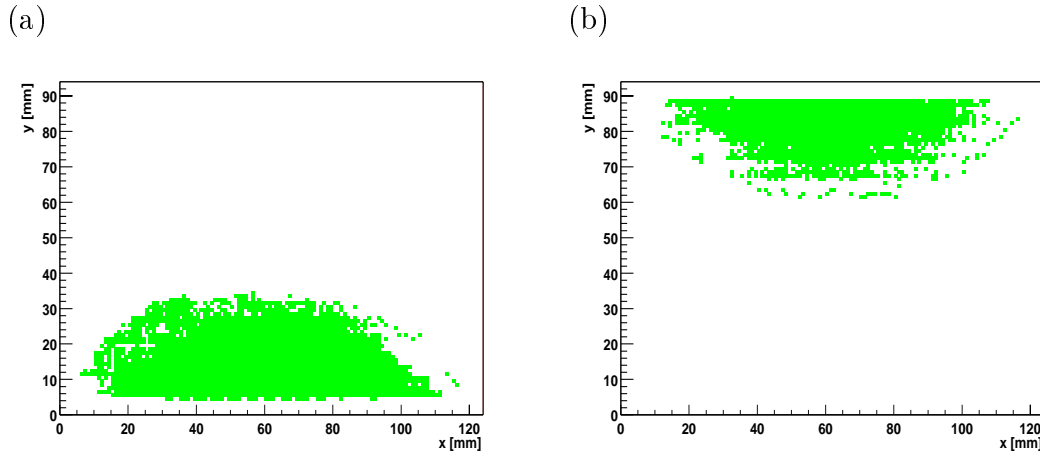


Abbildung 3.8: Bereiche mit mehr als 10 Einträgen in den Energiehistogrammen der einzelnen Kästchen. In (a) ist dieser Bereich für das obere, in (b) für das untere Modul dargestellt.

sehen, daß der Bereich im oberen Modul größer ist als im unteren. Dies liegt daran, daß sich das obere Modul näher an der Strahlröhre befindet und deshalb auch mehr gestreute Elektronen in dieses gelangen.

Um den Bereich, in dem ein Faktor bestimmt werden kann, zu vergrößern, wird zusätzlich zu dem Gitter mit Kästchen von 1 mm Seitenlänge ein Gitter mit 5 mm Seitenlänge über die Module gelegt, und zwar in der Art, daß in jedes Kästchen mit 5 mm Seitenlänge genau 25 Kästchen des 1mm-Gitters passen. Für alle selektierten Ereignisse wird nun die gleiche Prozedur wie oben durchgeführt, wobei die Energien jetzt in die dem Auftreffpunkt entsprechenden Kästchen der Kantenlänge 5 mm zugeordnet werden. Der Kalibrationsfaktor ergibt sich für jedes Kästchen genauso wie in Gleichung 3.12, der Fehler dieses Faktors aus Gleichung 3.13. Auch hier wird gefordert, daß die Anzahl der Einträge mindestens 10 sein muß.

Abbildung 3.9 zeigt für beide Module die Bereiche, in denen die Histogramme der Kästchen mit 5 mm Seitenlänge mindestens 10 Einträge haben. Es ist zu erkennen, daß der entsprechende Bereich für beide Module größer geworden ist. Um die endgültigen absoluten Kalibrationsfaktoren für jedes 1mm-Kästchen zu bestimmen, müssen die in den beiden Prozeduren ermittelten Faktoren miteinander verbunden werden. Wenn für ein 1mm-Kästchen ein Faktor bestimmt werden konnte, weil sich genügend Einträge im Energiehistogramm des Kästchens befanden, dann ist dieser Faktor der endgültige Kalibrationsfaktor. Falls kein Faktor bestimmt werden konnte, wird der Faktor des entsprechenden Kästchens mit 5 mm Seitenlänge als endgültiger Kalibrationsfaktor genommen. Da die beiden Gitter genau so über

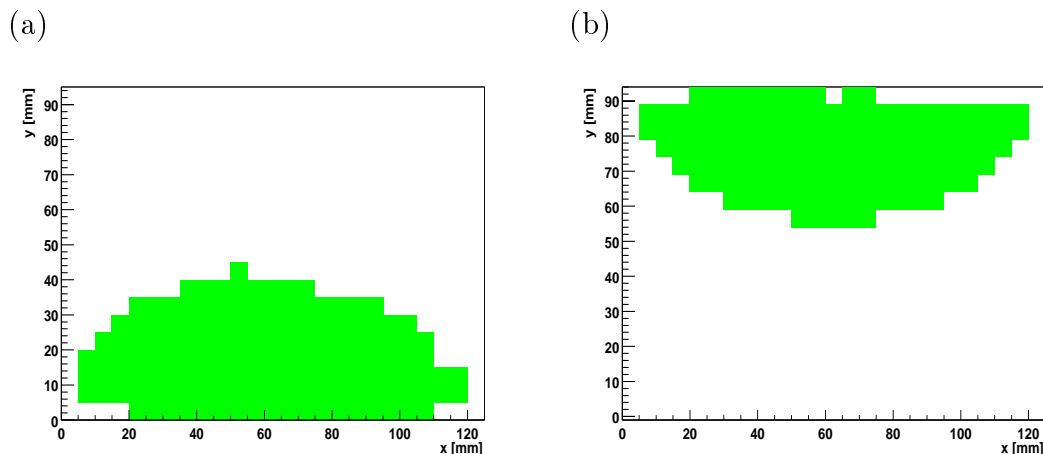


Abbildung 3.9: Bereiche mit mehr als 10 Einträgen in den Energiehistogrammen der einzelnen Kästchen mit 5 mm Seitenlänge: in (a) für das obere, in (b) für das untere Modul.

die Kalorimetermodule gelegt wurden, daß in jedes 5mm-Kästchen genau 25 1mm-Kästchen passen, gibt es für jedes kleine Kästchen genau ein zugeordnetes großes. Falls ein 1mm-Kästchen in dem Bereich liegt, in dem auch in dem zugeordneten 5mm-Kästchen kein Faktor bestimmt werden konnte, wird zunächst kein Faktor für das kleine Kästchen bestimmt.

Die auf diese Weise ermittelten absoluten Kalibrationsfaktoren sind in Abbildung 3.10 dargestellt. Für das obere Modul konnten aufgrund der größeren Statistik mehr Kalibrationsfaktoren ermittelt werden. Der Mittelwert der ermittelten absoluten Kalibrationsfaktoren beträgt für das obere Modul 1.081, für das untere Modul 1.077. Für die 1mm-Kästchen beider Module, für die kein Faktor bestimmt werden konnte, werden die absoluten Kalibrationsfaktoren nun auf den entsprechenden Mittelwert aller Faktoren des jeweiligen Moduls gesetzt. Als Fehler wird die Standardabweichung der ermittelten Kalibrationsfaktoren als Maß angenommen, die für das obere Modul 0.040 und für das untere Modul 0.034 beträgt.

Somit wurde nach der Unterteilung des VLQ-Kalorimeters in Kästchen mit einer Seitenlänge von 1 mm für jedes dieser Kästchen ein absoluter Kalibrationsfaktor ermittelt.

### 3.5.2 Ergebnis der Kalibrationsfaktorbestimmung

In Abbildung 3.11 sind für beide Module die ermittelten Kalibrationsfaktoren dargestellt. In den Bereichen, in denen aufgrund der zu geringen Statistik keine eigenen Kalibrationsfaktoren bestimmt werden konnten, haben alle Kästchen eines Moduls jeweils denselben Faktor. Für beide Module ist die Tendenz zu sehen, daß die absoluten Kalibrationsfaktoren mit wachsendem Abstand zum Strahlrohr größer werden, bis schließlich der Bereich mit den einheitlichen Faktoren beginnt.

Die ermittelten relativen Fehler (in Prozent) der absoluten Kalibrationsfakto-

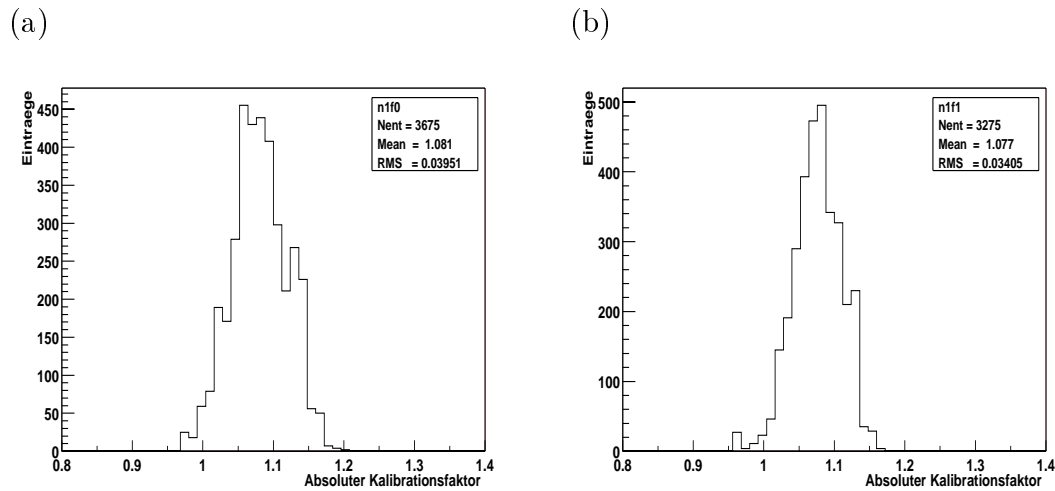


Abbildung 3.10: Absolute Kalibrationsfaktoren für beide Kalorimetermodule: (a) Faktoren des oberen Moduls; (b) Faktoren des unteren Moduls.

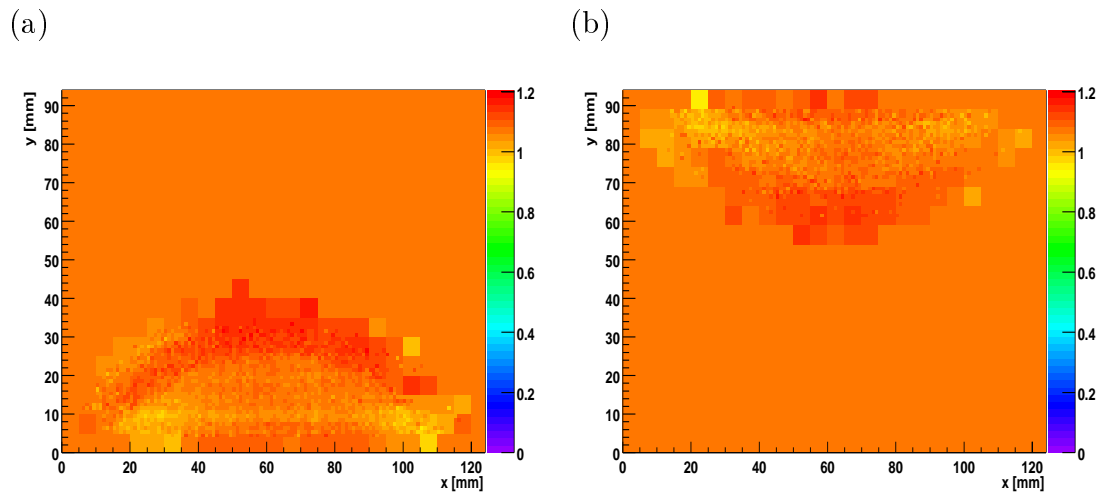
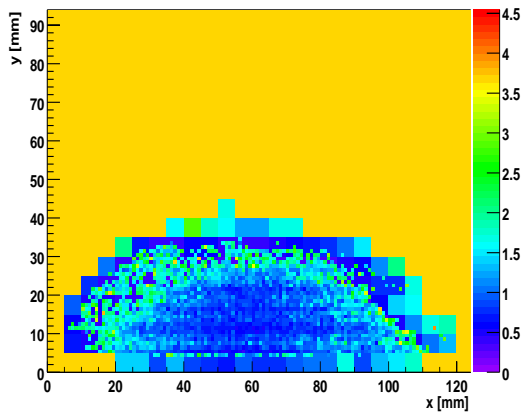


Abbildung 3.11: Absolute Kalibrationsfaktoren für beide Kalorimetermodule: in (a) für das obere, in (b) für das untere Modul. Der Faktor für den Bereich mit zu geringer Statistik beträgt im oberen Modul 1.081, im unteren Modul 1.077.

(a)



(b)

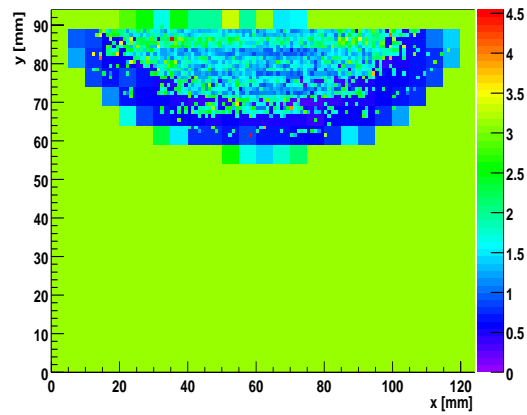


Abbildung 3.12: Fehler der absoluten Kalibrationsfaktoren in Prozent für beide Kalorimetermodule. Für das obere Modul (a) beträgt der Fehler im Bereich, in der die Statistik zu gering ist, 3.7%, für das untere Modul (b) 3.2%.

ren sind in Abbildung 3.12 dargestellt. Für beide Module liegen die prozentualen relativen Fehler der absoluten Kalibrationsfaktoren unter 4.5%. Im Bereich der einheitlichen Faktoren liegt dieser Fehler bei 3.7% für das obere Modul, für das untere Modul beträgt er 3.2%.

# Kapitel 4

## Das Ergebnis der Kalibration des VLQ-Kalorimeters

### 4.1 Anwendung der Kalibrationskonstanten

Im folgenden werden die Auswirkungen der Kalibration des VLQ-Kalorimeters untersucht. Dazu werden für die 316304 vorselektierten Ereignisse die Verteilungen der rekonstruierten Cluster-Energien vor und nach der Kalibration bestimmt.

Die Kalibration des VLQ-Kalorimeters, die in dieser Arbeit beschrieben wird, basiert auf der Teststrahlkalibration. Deshalb wird die Verteilung vor der Kalibration mit den aus dem Teststrahl ermittelten Kanalkalibrationsfaktoren, die nach der Kalibration unter Verwendung der im vorigen Kapitel bestimmten Kalibrationsfaktoren ermittelt. Anschließend werden die aus den Verteilungen gewonnenen Werte für die relative Energieauflösung des Kalorimeters miteinander verglichen.

#### 4.1.1 Verteilungen der Cluster-Energie vor und nach der Kalibration

##### Cluster-Energie vor der Kalibration

Zuerst wird die Verteilung der Cluster-Energie, wie sie sich vor der Kalibration ergibt, ermittelt. Die Cluster-Energien der vorselektierten Ereignisse werden dazu wie in Abschnitt 3.5.1 bestimmt. Es wird in jedem Array die Summe aus der Energie des maximalen Kanals und vier Kanälen zur rechten und linken Seite gebildet. Die Summe der vier Array-Energien ergibt dann die Cluster-Energie. Abbildung 4.1 zeigt die auf diese Weise ermittelte Energieverteilung. Um die Energieauflösung zu bestimmen, wurde die rechte abfallende Flanke des kinematischen Peaks mit einer Gaußkurve gefittet. Um sowohl den Peak als auch den Ausläufer zu hohen Energien korrekt zu beschreiben, müßten eigentlich zwei Gaußkurven verwendet werden. Für die hier angestellten Betrachtungen wird allerdings nur eine Gaußkurve verwendet, mit der sowohl der Peak als auch der Ausläufer beschrieben wird. Die relative Energieauflösung ergibt sich aus dem Verhältnis der Standardabweichung  $\sigma$  zum Mittelwert  $\mu$  der Gaußkurve. Mit der in Abbildung 4.1 eingezeichneten

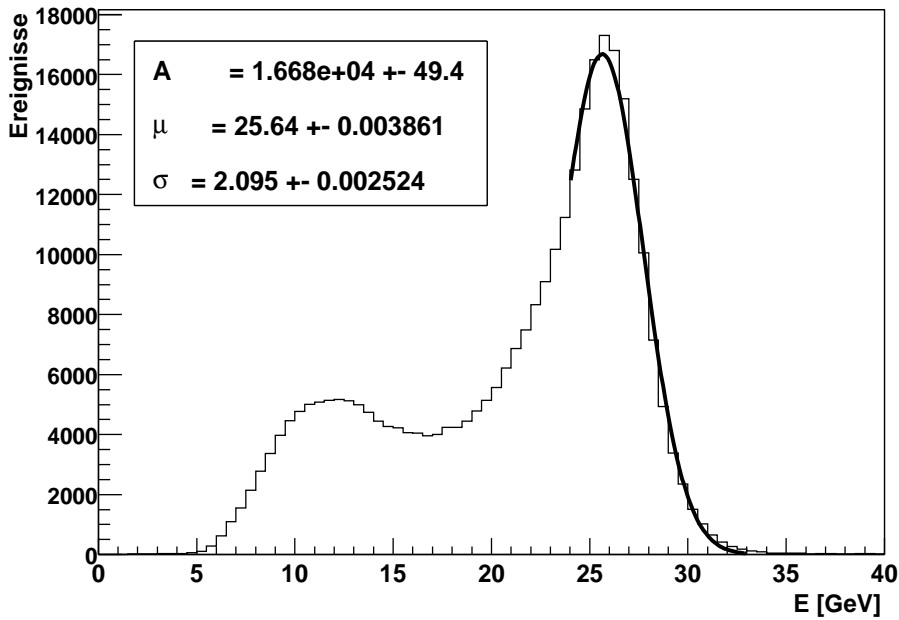


Abbildung 4.1: Die Verteilung der rekonstruierten Cluster-Energien aller vorselektierten Ereignisse vor der Kalibration. Die relative Energieauflösung bei 25.64 GeV beträgt 8.17%.

Gaußfunktion wird der Peak in einem Bereich von 24 GeV bis 33 GeV gefittet. Aus den Werten für  $\sigma$ , das die absolute Energieauflösung angibt, und  $\mu$  ergibt sich die relative Energieauflösung bei 25.64 GeV zu

$$\frac{\sigma(25.64 \text{ GeV})}{25.64 \text{ GeV}} = (8.17 \pm 0.01)\%. \quad (4.1)$$

### Cluster-Energie nach der Kalibration

Nun wird die Verteilung der Cluster-Energie, wie sie sich nach der Kalibration ergibt, ermittelt. Dazu wird für jedes der vorselektierten Ereignisse zunächst die Energie des Clusters berechnet. Dafür werden die Kanalenergien mit den in Abschnitt 3.4 bestimmten Kanalkalibrationsfaktoren multipliziert und dann wie üblich die Cluster-Energie berechnet. Anschließend wird der Cluster-Ort rekonstruiert. Dies geschieht mit der in Abschnitt 3.5.1 beschriebenen logarithmischen Gewichtung, wobei wie bei der Energierekonstruktion in jedem Array der maximale Kanal und vier Nachbarkanäle zu beiden Seiten berücksichtigt werden. Um die endgültige Cluster-Energie zu erhalten, muß die berechnete Energie noch mit einem absoluten Kalibrationsfaktor multipliziert werden, der dem rekonstruierten Cluster-Ort entspricht. Es muß also für einen rekonstruierten Ort genau das Kästchen gesucht werden, in dem sich dieser Auftreffpunkt befindet und dann die Energie mit dem absoluten Kalibrationsfaktor multipliziert werden, der für das jeweilige Kästchen ermittelt wurde.

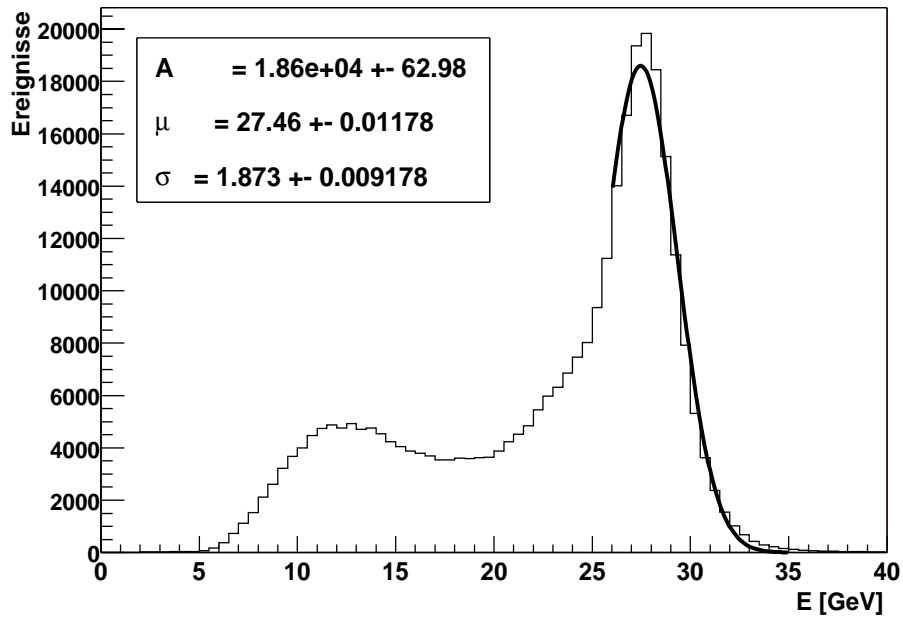


Abbildung 4.2: Die Verteilung der rekonstruierten Cluster-Energien nach der Kalibration. Die relative Auflösung bei 27.46 GeV beträgt 6.82%.

In Abbildung 4.2 ist für die vorselektierten Ereignisse die Energieverteilung der Cluster dargestellt. Zur Bestimmung der relativen Energieauflösung, die sich nach der Kalibration ergibt, wird an die rechte Flanke des kinematischen Peaks eine Gaußkurve im Bereich von 26 GeV bis 35 GeV gefittet. Es ist zu sehen, daß die absolute Energieauflösung von jetzt  $\sigma=1.9$  GeV nach der Kalibration, im Vergleich zu der vor der Kalibration ermittelten absoluten Energieauflösung von  $\sigma=2.1$  GeV, besser geworden ist. Für die relative Energieauflösung bei 27.46 GeV ergibt sich mit den Werten für  $\sigma$  und  $\mu$ , die die Gaußkurve in Abbildung 4.2 beschreiben, der Wert

$$\frac{\sigma(27.46 \text{ GeV})}{27.46 \text{ GeV}} = (6.82 \pm 0.03)\%. \quad (4.2)$$

Die relative Energieauflösung des VLQ-Kalorimeters ist somit nach der Kalibration besser als vor der Kalibration.

#### 4.1.2 Einordnung der ermittelten Energieauflösung

Die durch die Kalibration des VLQ-Kalorimeters ermittelte relative Energieauflösung wird nun mit der in Gleichung 2.8 angegebenen Formel verglichen. Diese Formel wurde mit Hilfe von Elektronen aus dem Teststrahl bestimmt, wobei deren Energien zwischen 1 GeV und 6 GeV betragen. In Abbildung 4.3 sind die relative Energieauflösung, wie sie durch die Formel gegeben wird, die Werte aus dem Teststrahl und die beiden Werte vor und nach der Kalibration eingetragen. Dabei ist der Wert von

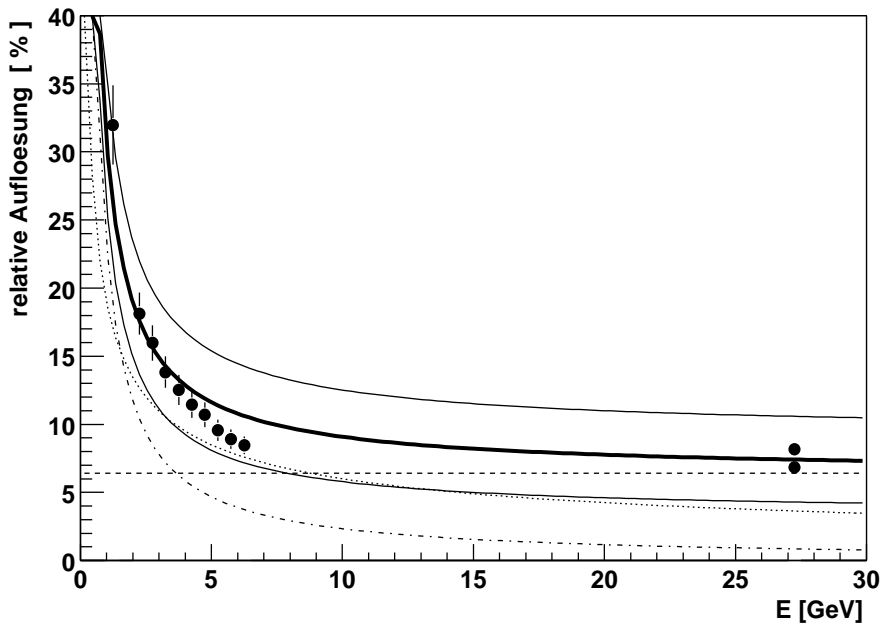


Abbildung 4.3: Die relative Energieauflösung des VLQ-Kalorimeters. Die drei durchgezogenen Linien entsprechen der in Gleichung 2.8 angegebenen Kurve mit den angegebenen Fehlern. Die gepunktete Kurve gibt den Beitrag des Sampling-Terms zur Energieauflösung an, die gestrichelte Linie den Beitrag des konstanten Terms und die gepunktet-gestrichelte Kurve den Beitrag des Rauschterms. Die Werte für den Bereich zwischen 1 GeV und 6 GeV wurden im Teststrahl ermittelt [6], die Werte bei 27.46 GeV ergeben sich vor bzw. nach der Kalibration.

8.17%, der sich vor der Kalibration ergibt, für  $E = 27.46$  GeV eingetragen. Dies liegt daran, daß mit dem unkalibrierten Kalorimeter die Cluster-Energien falsch gemessen werden und somit auch das Maximum des Peaks in der Verteilung bei der zu geringen Energie von  $E = 25.64$  GeV liegt. In der Verteilung der Cluster-Energien nach der Kalibration, die sich durch Anwendung der in dieser Arbeit ermittelten Kalibrationsfaktoren ergibt, liegt das Maximum des kinematischen Peaks dann bei  $E = 27.46$  GeV.

Die drei durchgezogenen Linien ergeben sich aus Gleichung 2.8, wenn die darin angegebenen Fehler berücksichtigt werden. Die Beiträge der einzelnen Terme zur relativen Energieauflösung sind ebenfalls in der Abbildung eingezeichnet: Die gepunktete Linie stellt den Sampling-Term der Energieauflösung dar, die gestrichelte Kurve gibt den Beitrag des konstanten Terms und die gepunktet-gestrichelte Kurve den Beitrag des Rauschterms zur relativen Energieauflösung an. Der Wert von 6.82%, der für die relative Auflösung nach der Kalibration ermittelt wurde, ist mit der Kurve innerhalb deren Fehler verträglich; er liegt sogar noch unterhalb des Wertes, der bei  $E = 27.46$  GeV von der Gleichung gegeben wird. Bei dieser Energie wird der Hauptbeitrag zur Energieauflösung vom konstanten Term geliefert.



Den Meßwerten, die aus dem Teststrahl und nach der Kalibration ermittelt wurden, wird nun eine Kurve der Form von Gleichung 2.4 angepaßt. Dabei können die darin enthaltenen Parameter  $P_1$ ,  $P_2$  und  $P_3$  frei variieren. Die relative Energieauflösung wird als Funktion von  $1/\sqrt{E}$  dargestellt. Dadurch sind die Bereiche, in denen die Auflösung von den verschiedenen Beiträgen dominiert wird, besser zu erkennen. In Abbildung 4.4 ist das Ergebnis der Anpassung zu sehen. Die durchge-

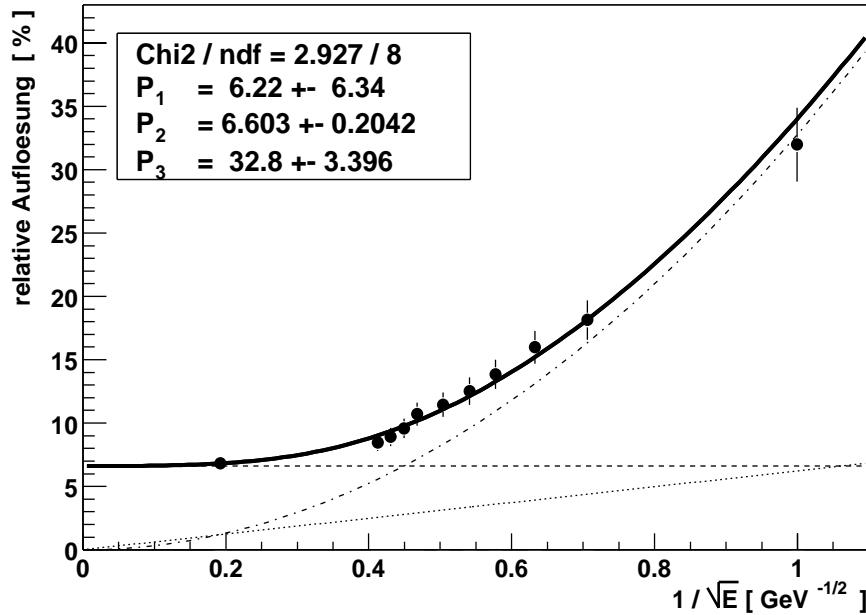


Abbildung 4.4: Die relative Energieauflösung des VLQ-Kalorimeters als Funktion von  $1/\sqrt{E}$ . Die durchgezogene Linie entspricht der Anpassung einer Kurve der Form von Gleichung 2.4. Die Beiträge der ermittelten Parameter  $P_1$ ,  $P_2$  und  $P_3$  sind als Linien ebenfalls eingezeichnet (vgl. Abbildung 4.3).

zogene Linie entspricht der aus der Anpassung ermittelten Kurve. Für den Parameter  $P_1$  des Sampling-Terms wurde der Wert  $P_1 = (6.2 \pm 6.3)\%$ , für den konstanten Term der Wert  $P_2 = (6.6 \pm 0.2\%)$  und für den Parameter  $P_3$  des Rauschterms der Wert  $P_3 = (32.8 \pm 3.4)\%$  ermittelt. Die Beiträge der einzelnen Terme sind ebenfalls in der Abbildung zu sehen, wobei auch hier die gepunktete Linie den Beitrag des Sampling-Terms, die gestrichelte Linie den Beitrag des konstanten Terms und die gepunktet-gestrichelte Kurve den Beitrag des Rauschterms darstellt.

Die ermittelten Parameterwerte werden nun mit den Werten aus Gleichung 2.8 verglichen. In Abbildung 4.4 ist zu erkennen, daß für große Energien (kleine  $1/\sqrt{E}$ -Werte) der konstante Term dominiert, für kleine Energien (große  $1/\sqrt{E}$ -Werte) dagegen der Rauschterm. Deshalb werden die Parameter  $P_2$  und  $P_3$  durch die Anpassung relativ gut bestimmt. Der für den Parameter  $P_2$  ermittelte Wert ist dabei mit dem Wert von  $(6.4 \pm 3)\%$  aus der Gleichung verträglich; auch der für den Parameter  $P_3$  bestimmte Wert liegt im Bereich des Wertes von  $(23.4 \pm 0.9)\%$ , der in der Glei-

chung angegeben wird. Der Parameter  $P_1$  des Sampling-Terms kann aus den hier vorliegenden Meßpunkten nur sehr ungenau bestimmt werden. In der Gleichung ist für den Parameter  $P_1$  der Wert  $(19 \pm 6)\%$  angegeben. Aus einer Schauersimulation ergab sich allerdings ein Wert von  $P_1 = 12.9\%$  [6]. Mit diesem ist der hier ermittelte Wert von  $P_1 = (6.2 \pm 6.3)\%$  innerhalb des Fehlers verträglich.

## 4.2 Abschätzung zur Güte der Kalibration

Um eine Aussage über die Güte der Kalibration machen zu können, wird die Verteilung der Cluster-Energien, wie sie sich nach der Kalibration ergibt, betrachtet.

Die rechte Flanke des kinematischen Peaks wird in verschiedenen Energiebereichen mit Gaußkurven gefittet. Dabei ergibt sich, daß der Mittelwert der Gaußverteilungen in einem Bereich zwischen 27.46 GeV und 27.60 GeV liegt. Wird dieser Bereich ins Verhältnis zur Elektronenstrahlenergie von 27.56 GeV gesetzt, so ergibt sich, daß in diesem Energiebereich die Güte der Kalibration etwa 0.5% beträgt, da die Lage des kinematischen Peaks nach der Kalibration bis auf 0.5% mit der eigentlichen Energie des Peaks von 27.56 GeV übereinstimmt: Die Energieskala ist in diesem Energiebereich bis auf 0.5% bekannt.

# Zusammenfassung

Im Rahmen dieser Arbeit wurde für das VLQ-Kalorimeter eine absolute Energieeichung vorgenommen.

Das VLQ-Kalorimeter besteht aus zwei identischen Modulen, die oberhalb und unterhalb der Strahlröhre angebracht sind. Hierbei handelt es sich um ein Sampling-Kalorimeter, das aus abwechselnden Schichten von Wolfram als passivem Material und aus aktivem Szintillatormaterial aufgebaut ist. Die Szintillatorflächen sind abwechselnd von Schicht zu Schicht in horizontaler bzw. vertikaler Richtung segmentiert. Durch diese Struktur kann der Auftreffpunkt der Elektronen bestimmt werden. Das Licht aus den Szintillatoren wird dabei über Wellenlängenschieber von Photodioden ausgelesen.

Die Kalibration des VLQ-Kalorimeters wurde mit Elektronen aus dem kinematischen Peak durchgeführt. Dieser zeichnet sich dadurch aus, daß die Energie des Elektrons nach der Wechselwirkung mit dem Proton exakt der ursprünglichen Elektronenstrahlenergie von 27.56 GeV entspricht. Die Kalibration des VLQ-Kalorimeters wurde in zwei Schritten durchgeführt: Zuerst wurden die Auslesekkanäle des Kalorimeters gegeneinander abgeglichen. Dazu wurde für jeden Kanal ein Faktor bestimmt, so daß alle Kanäle bei gleichen Eingangssignalen auch gleiche Ausgangssignale liefern. Im zweiten Schritt wurden dann ortsabhängige absolute Kalibrationsfaktoren bestimmt. Hierzu wurde über beide Kalorimetermodule ein Gitter mit einer Feinheit von 1 mm gelegt und für jedes der Gittersegmente ein absoluter Kalibrationsfaktor ermittelt.

Um das Ergebnis der Kalibration zu überprüfen, wurde die relative Energieauflösung des Kalorimeters bei der Elektronenstrahlenergie vor und nach der Kalibration ermittelt. Durch die Anwendung der in dieser Arbeit bestimmten Kalibrationsfaktoren verbesserte sich die Energieauflösung von  $(8.17 \pm 0.01)\%$  vor der Kalibration auf  $(6.82 \pm 0.03)\%$  nach der Kalibration. Der ermittelte Wert für die Energieauflösung nach der Kalibration ist dabei mit den Werten, die sich aus Schauersimulationen und Teststrahlmessungen ergaben, verträglich. Es zeigt sich außerdem, daß die Energieskala im Bereich der Elektronenstrahlenergie mit einer Genauigkeit von 0.5% bekannt ist.

Durch die Anwendung der in dieser Arbeit ermittelten Kalibrationsfaktoren kann somit die Energie einfallender Teilchen genauer bestimmt werden, wodurch eine präzisere Messung physikalischer Größen, wie z.B. der Protonstrukturfunktion  $F_2$  möglich und dadurch ein besseres Verständnis der kleinsten Strukturen der Materie auf Elementarteilchenniveau erreicht wird.



# Literaturverzeichnis

- [1] HERA, "A Proposal for a large Electron-Proton Colliding Beam Facility at DESY" (1981)
- [2] B. Povh et al., "Teilchen und Kerne" (1997)
- [3] H1 Collaboration, "The H1 Detector at HERA", DESY internal report H1-96-01 (1996)
- [4] H1 Collaboration, "Technical Proposal to build a Special Spectrometer covering Very Small Momentum Transfers" (1996)
- [5] C. Grupen, "Teilchendetektoren" (1993)
- [6] A. Stellberger, "Entwicklung und Bau eines kompakten elektromagnetischen Kalorimeters", Doktorarbeit, IHEP Universität Heidelberg (1998)
- [7] F.Jacquet, A.Blondel, "Detectors for charged current events", DESY (1979)



# Danksagung

An dieser Stelle möchte ich mich bei allen bedanken, die zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen haben. Besonders hervorheben möchte ich

- Herrn Prof. Dr. K. Meier, der mir diese Arbeit ermöglichte und mich während ihrer Entstehung betreute und unterstützte,
- Herrn Dr. J. Stiewe für die interessanten und hilfreichen Gespräche und das stete Korrekturlesen,
- Thomas Berndt, der für jede Frage ein offenes Ohr hatte und bei Problemen hilfreich zur Seite stand,
- Oiver Nix für das Korrekturlesen,
- die H1- und ALEPH-Gruppe für das freundliche Arbeitsklima,
- die Mitarbeiter des Kirchhoff-Instituts für Physik sowie
- Ina Kyas für das Korrekturlesen und die moralische Unterstützung.