

Fleischer FH1K

15x

Eichung und Inbetriebnahme eines  
Eisen-Szintillator-Kalorimeters  
für Strahluntergrundmessungen  
am H1-Experiment während  
des HERA-Testbetriebs

Experimentelle physikalische Diplomarbeit  
an der Universität Hamburg  
in der Gruppe FH1T am DESY

von

THOMAS HUNOLD ✓

17. Dezember 1991



# Inhaltsverzeichnis

|  |           |
|--|-----------|
| <b>Einleitung</b>  | <b>1</b>  |
| <b>1 Das Rahmenprojekt HERA</b>  | <b>2</b>  |
| 1.1 Die HERA-Speicherringe . . . . .                                     | 2         |
| 1.2 Der H1-Detektor . . . . .  | 4         |
| 1.3 Physik mit HERA . . . . .  | 4         |
| 1.4 Der Strahluntergrund . . . . .                                       | 6         |
| <b>2 Das Eisen-Szintillator-Kalorimeter</b>                              | <b>8</b>  |
| 2.1 Wechselwirkung von Strahlung mit Materie . . . . .                   | 8         |
| 2.1.1 Elektromagnetische Schauer . . . . .                               | 10        |
| 2.1.2 Hadronische Schauer . . . . .                                      | 11        |
| 2.2 Beschreibung des Eisen-Szintillator-Kalorimeters . . . . .           | 13        |
| 2.2.1 Struktur der Kalorimetermodule . . . . .                           | 13        |
| 2.2.2 Szintillatoren und Photomultiplier . . . . .                       | 13        |
| 2.2.3 Funktionsweise des Kalorimeters, Eichung und Überwachung . . . . . | 14        |
| 2.2.4 Energieauflösungsvermögen . . . . .                                | 16        |
| 2.3 Relative Eichung des Kalorimeters mit kosmischen Myonen . . . . .    | 17        |
| 2.3.1 Meßaufbau . . . . .  | 17        |
| 2.3.2 Auswertung der Eichdaten . . . . .                                 | 19        |
| <b>3 Meßaufbau am H1-Wechselwirkungspunkt</b>                            | <b>22</b> |
| 3.1 Triggerlogik . . . . .   | 22        |
| 3.2 CAMAC-Auslesesoftware . . . . .                                      | 25        |
| 3.3 Offline-Analyse-Programmbibliothek . . . . .                         | 26        |
| <b>4 Untergrund des Elektronenstrahls bei 26.6 GeV</b>                   | <b>27</b> |
| 4.1 Dosimeterauswertung . . . . .  | 27        |
| 4.2 Zählraten . . . . .  | 28        |
| 4.3 Triggerung . . . . .   | 30        |
| 4.4 Elektromagnetische Schauer . . . . .                                 | 32        |
| 4.5 Myonen . . . . .   | 32        |
| 4.5.1 Darstellung der Myonenspuren . . . . .                             | 33        |
| 4.5.2 Untergrundraten der Myonen . . . . .                               | 36        |
| 4.5.3 Energiespektrum der Myonen . . . . .                               | 36        |
| <b>Zusammenfassung</b>   | <b>38</b> |
| <b>A Ergänzungen zur Kalorimetereichung</b>                              | <b>39</b> |
| A.1 Ergebnisse der ADC-Eichung . . . . .                                 | 39        |
| A.2 Ortsabhängigkeit der Pulshöhenspektren . . . . .                     | 40        |

|  |           |
|--|-----------|
| <b>B Ergänzungen zur Auswertung des Elektronenruns</b> | <b>43</b> |
| B.1 Winkelverteilung der Myonenspuren . . . . .        | 43        |
| B.2 Myonenspuren . . . . .                             | 44        |
| <b>Literaturverzeichnis</b>                            | <b>46</b> |
| <b>Abbildungsverzeichnis</b>                           | <b>48</b> |
| <b>Tabellenverzeichnis</b>                             | <b>49</b> |
| <b>Danksagung und Erklärung laut Prüfungsordnung</b>   | <b>50</b> |

# Einleitung

Die Elementarteilchenphysik befaßt sich mit der Suche nach den elementaren Bestandteilen der Materie und der Beschreibung der Wechselwirkungen zwischen ihnen. Über die Jahre haben sich die Größenordnungen verschoben, innerhalb der Teilchen als elementar galten. Der Entdeckung des Atoms ( $10^{-8} \text{ cm}$ ) folgte die der Atomkerne ( $10^{-12} \text{ cm}$ ) und in den Kernbausteinen, den Nukleonen ( $10^{-13} \text{ cm}$ ) konnte man die Quarks identifizieren, die heute zusammen mit den Leptonen als elementar gelten.

Bei HERA, der 1991 bei DESY in Hamburg in Betrieb genommenen Hadron-Elektron-Ring-Anlage, werden Protonen und Elektronen in zwei Speicherringen gegenläufig beschleunigt und können an ausgewählten Wechselwirkungspunkten zur Kollision gebracht werden. HERA läßt sich als „Mikroskop“ auffassen, das bei einer erreichbaren Schwerpunktsenergie von  $\sqrt{s} = 314 \text{ GeV}$ , Strukturen in der Größenordnung von  $10^{-18} \text{ cm}$  aufzulösen erlaubt. Die Elektronen fungieren dabei als Sonden, die die innere Struktur der Protonen abtasten.

Zur Rekonstruktion physikalischer Ereignisse wurden zwei Detektoren — H1 und ZEUS — gebaut, die die Wechselwirkungspunkte hermetisch umschließen, um alle durch die Kollisionen erzeugten Wechselwirkungsprodukte zu registrieren. Störungen der Datennahme und Detektorschädigungen sind durch verloren gegangene Strahlteilchen und deren Folgeprodukte zu erwarten, die außerhalb des Strahlrohrs mit den Teilchenpaketen (Bunchen) mitfliegen. Ursache dieses Strahluntergrundes sind Wechselwirkungen der gespeicherten Protonen und Elektronen mit dem Restgas im Strahlrohr (Beam-Gas-Wechselwirkungen) sowie mit dem Strahlrohr selbst (Beam-Wall-Wechselwirkungen).

Während der Beschleuniger-Testläufe wurde neben dem vorgesehenen Wechselwirkungspunkt des H1-Experimentes ein vom CERN zur Verfügung gestelltes und nachzeichendes Eisen-Szintillator-Kalorimeter installiert, um Informationen über Rate, Energie und Reichweite des Strahluntergrundes zu erhalten. Die Messungen sollten Aufschluß darüber geben, ob für den H1-Detektor zusätzliche Abschirmungsmaßnahmen erforderlich sind.

Im Rahmen dieser Diplomarbeit waren folgende Aufgaben durchzuführen:

- Test und Eichung des Kalorimeters mit kosmischen Myonen. Hierzu waren eine elektronische Triggerschaltung aufzubauen und Programme zur Datenauswertung zu verfassen.
- Installation des Kalorimeters im Bereich der Wechselwirkungszone des H1-Detektors und Entwicklung einer Triggerlogik.
- Verfassung einer Programm-Bibliothek zur Datenanalyse.
- Auswertung der Untergrundmessungen am Elektronenstrahl bei  $26.6 \text{ GeV}$ .

In dieser Diplomarbeit werden, nach einem Überblick über das HERA-Projekt, allgemeine Ursachen für Strahluntergrund beschrieben und einige quantitative Abschätzungen zu den bei HERA zu erwartenden Teilchenverlusten angegeben. Es folgt ein Abschnitt über die Wechselwirkung von Strahlung mit Materie und die Beschreibung des Eisen-Szintillator-Kalorimeters, wobei einige Ergebnisse der am CERN durchgeführten Messungen referiert werden. Im Anschluß daran wird die am DESY durchgeführte Eichung mit kosmischen Myonen dargestellt. Der Beschreibung der geometrischen Verhältnisse am Meßplatz und der Komponenten der elektronischen Signalverarbeitung folgt ein Kapitel über die Analyse des Elektronenstrahluntergrundes bei  $26.6 \text{ GeV}$ .



menden Energieverlust durch Synchrotronstrahlung<sup>1</sup> begrenzt. Mit normalleitenden Beschleunigungsstrecken lassen sich bei HERA Elektronen mit einer Energie von  $26.6\text{GeV}$  speichern. Erst durch den ergänzenden Einsatz von supraleitenden Hohlraumresonatoren werden Energien von mehr als  $30\text{GeV}$  erreicht. Die erreichbare Protonenenergie ist durch die technisch mögliche Feldstärke der magnetischen Führungsfelder eingeschränkt. Supraleitende Dipolmagnete, mit deren Hilfe sich ein Führungsfeld von  $4.68\text{Tesla}$  aufbauen läßt, erlauben die Speicherung von Protonen mit einer Energie von  $820\text{GeV}$ . Zur Aufrechterhaltung des supraleitenden Zustandes ist eine aufwendige Helium-Kühlanlage erforderlich und ein Sicherheitssystem, daß beim plötzlichen und unerwarteten Übergang in den normalleitenden Zustand („quenchen“) eine Zerstörung der Magnete verhindert.

Die Beschleunigung durch hochfrequente elektromagnetische Wechselfelder prägt beiden Strahlen eine *Bunchstruktur* auf. Das Wechselspiel aus Energieabstrahlung und ständiger Nachbeschleunigung komprimiert die Elektronenbunche auf eine Länge von etwa  $2.5\text{cm}$  und setzt die Störungsanfälligkeit des Strahls gegenüber kurzzeitigen Schwankungen der Magnetstromversorgung stark herab (*Strahlungsdämpfung*). Der Protonenstrahl ist deutlich anfälliger gegen derartige Störungen und die Bunche sind ausgedehnter.

Der HERA-Ringtunnel mit einem Umfang von  $6.3\text{km}$  ist unterirdisch in einer Tiefe von 10 bis  $25\text{m}$  verlegt und über vier symmetrisch am Ring angeordnete Experimentierhallen zugänglich. In Halle Nord ist das H1-Experiment in Vorbereitung, in Halle Süd das ZEUS-Experiment. Vor der Injektion in HERA durchlaufen Elektronen und Protonen jeweils drei Vorbeschleuniger. Im Kollisionsbetrieb sind also acht Beschleuniger gleichzeitig in Betrieb.

|                                   | Elektronenring       | Protonenring                                    |
|-----------------------------------|----------------------|---|
| Maximalenergie                    | $30\text{GeV}$       | $820\text{GeV}$                                 |
| Schwerpunktsenergie               |                      | $314\text{GeV}$                                 |
| Einschußenergie                   | $14\text{GeV}$       | $40\text{GeV}$                                  |
| Luminosität                       |                      | $1.5 \times 10^{31}\text{cm}^{-2}\text{s}^{-1}$ |
| Teilchenstrom                     | $60\text{mA}$        | $160\text{mA}$                                  |
| Teilchenzahl pro Bunch            | $3.5 \times 10^{10}$ | $10^{11}$                                       |
| Anzahl der Bunche                 | 210                  | 210   |
| Strahlkreuzungswinkel             |                      | $0\text{mrad}$ (Frontalkollision)               |
| Bunchabstand                      |                      | $28.8\text{m}$ ( $96\text{ns}$ )                |
| Bunchlänge (bei Maximalenergie)   | $25\text{mm}$        | $440\text{mm}$                                  |
| Strahlbreite in den WW-Punkten    | $0.264\text{mm}$     | $0.300\text{mm}$                                |
| Strahlhöhe in den WW-Punkten      | $0.017\text{mm}$     | $0.095\text{mm}$                                |
| Strahlungsverlust pro Umlauf      | $70.38\text{MeV}$    | einige $\text{eV}$                              |
| Polarisationszeit                 | $27\text{min}$       | —   |
| Ring-Füllzeit                     | $15\text{min}$       | $20\text{min}$                                  |
| Feldstärke der Haupt-Dipolmagnete | $0.16\text{Tesla}$   | $4.68\text{Tesla}$ (supral.)                    |
| Ringumfang                        |                      | $6336\text{m}$                                  |

Tabelle 1.1: Ringparameter von HERA ([SCH90]).

<sup>1</sup>Beschleunigte geladene Teilchen strahlen Energie in Form von Synchrotronlicht ab. Der Energieverlust  $\Delta E$  pro Umlauf auf einer Kreisbahn mit Radius  $r$  ergibt sich zu:

$$\Delta E = \frac{e^2}{3\epsilon_0 r} \cdot \frac{\beta^2 E_{\text{Beam}}^4}{(mc^2)^4} \quad (1.1)$$

Für relativistische ( $\beta \approx 1$ ) Elektronen ist — aufgrund der geringeren Masse  $m$  — der Energieverlust  $10^{13}$  mal größer als der von Protonen gleicher Energie (nach [PER87]).

## 1.2 Der H1-Detektor

Zum Nachweis der Wechselwirkungsprodukte, die aus den Elektronen-Protonen-Kollisionen hervorgehen, werden meist physikalische Effekte in atomaren Dimensionen genutzt und die Detektoren haben makroskopische Ausmaße. H1 (Abb.1.2) ist ein Hybrid-Detektor, der aus einer Vielzahl von Subdetektoren besteht, die sich gegenseitig ergänzen. Charakteristisch sind der asymmetrische Aufbau und die intensivere Instrumentierung in Protonenrichtung, wodurch dem größeren Impuls der Protonen im Laborsystem Rechnung getragen wird. In den Experimentierbereichen werden Elektronen und Protonen durch dasselbe Vakuumrohr geführt. Die strahloptischen Einrichtungen erlauben es, die Strahlen zur Kollision zu bringen oder aneinander vorbeizuführen. Die wichtigsten Komponenten des H1-Detektors sind:

**Zentrale Spurenkammer, Vorwärtsspurenkammer,**

**Supraleitende Spule, Kompensationsmagnet und Heliumkühlung:** Aus der Bahnkrümmung, die geladene Teilchen im Magnetfeld der Spule erfahren, lassen sich in den Spurenkammern Impulse und Ladungsvorzeichen bestimmen. Ein weiterer Magnet kompensiert die Störung des Strahls durch das Feld der Spule.

**Flüssig-Argon-Kalorimeter:** Das Sampling-Kalorimeter ist in einem Kryostaten untergebracht. Als aktives Detektormaterial wird flüssiges Argon verwendet. Bleischichten dienen als Aufschauernungsmedium für elektromagnetische, Stahlschichten für hadronische Schauer.

**Rückwärtskalorimeter und Plug-Kalorimeter:** Die beiden Kalorimeter schliessen — abgesehen vom Strahlrohr — die verbleibenden Öffnungen des Flüssig-Argon-Kalorimeters und werden zur Messung von Teilchenenergien unter kleineren Winkeln eingesetzt.

**Myonenkammern, Eisentoroid und instrumentiertes Eisen:** Mit Streamerröhren-Detektoren werden Myonen nachgewiesen, deren Impuls im Feld des Eisentoroids bestimmt werden kann. Die instrumentierte Eisenverschaltung wirkt als Joch zur Rückführung des magnetischen Flusses der supraleitenden Spule und zum Nachweis von Schauerausläufern die nicht im Flüssig-Argon-Kalorimeter absorbiert wurden.

**Vetowand:** Die nicht eingezeichnete Vetowand ist außerhalb des H1-Detektors direkt an der Protonenseite der Hallenwand montiert. Paare von in Koinzidenz geschalteten Szintillationszählern, die das Strahlrohr umschließen, sollen dem H1-Detektor Informationen über Untergrundereignisse liefern.

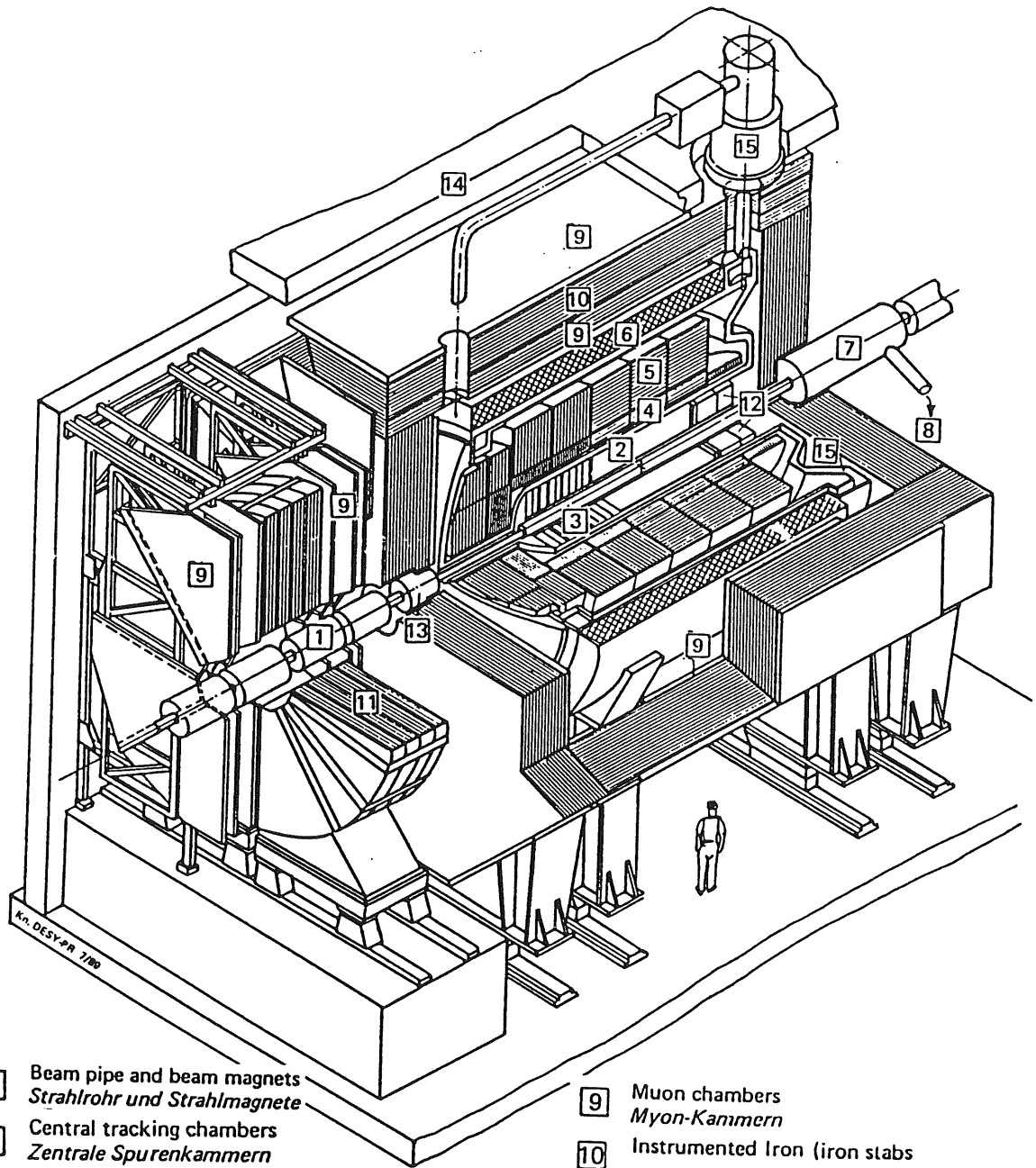
## 1.3 Physik mit HERA

Mit HERA lassen sich Elektron-Proton-Kollisionen mit der höchsten bisher erreichten Schwerpunktsenergie durchführen. Dies bedeutet für die Vermessung der Struktur von Protonen eine verbesserte Auflösung.

Die Schwerpunktsenergie ist ausreichend, um auch die schweren  $W^\pm$  und  $Z^0$ -Bosonen zu erzeugen, die die schwache Wechselwirkung vermitteln. Der Austausch der geladenen Bosonen findet nur statt, wenn Elektron und Proton die richtige relative Spinorientierung besitzen. Ein Nebeneffekt der Abstrahlung von Synchrotronlicht ist, daß die Elektronen teilweise polarisiert werden. Über Magnete können die Elektronenspins umgeklappt werden, so daß sich die Ereignisrate des  $W^\pm$ -Austausches vom Polarisationsgrad abhängig erhöhen bzw. absenken läßt.

Großes Interesse besteht auch an der Bestätigung und Verfeinerung bestehender Modellvorstellungen; einerseits durch den signifikanten Nachweis theoretisch vorhergesagter Teilchen, zum anderen durch die Messung von Modellparametern. Nicht auszuschließen ist, daß bei HERA bisher unbekannte Phänomene entdeckt werden, die den Weg zu einer vereinheitlichten Theorie der Elementarteilchen und deren Wechselwirkungen weisen könnten.





- |   |  |   |
|---|--|---|
| <p>1 Beam pipe and beam magnets<br/><i>Strahlrohr und Strahlmagnete</i></p> <p>2 Central tracking chambers<br/><i>Zentrale Spurenkammern</i></p> <p>3 Forward tracking chambers and Transition radiators<br/><i>Vorwärtspurkammern und Übergangsstrahlungsmodul</i></p> <p>4 Electromagnetic Calorimeter (lead)<br/><i>Elektromagnetisches Kalorimeter (Blei)</i></p> <p>5 Hadronic Calorimeter (stainless steel)<br/><i>Hadronisches Kalorimeter (Edelstahl)</i></p> <p>6 Superconducting coil (1.2 T)<br/><i>Supraleitende Spule (1,2 T)</i></p> <p>7 Compensating magnet<br/><i>Kompensationsmagnet</i></p> <p>8 Helium cryogenics<br/><i>Helium Kälteanlage</i></p> | <p>Liquid Argon<br/><i>Flüssig Argon</i></p> | <p>9 Muon chambers<br/><i>Myon-Kammern</i></p> <p>10 Instrumented Iron (iron slabs + streamer tube detectors)<br/><i>Instrumentiertes Eisen (Eisenplatten + Streamerröhren-Detektoren)</i></p> <p>11 Muon toroid magnet<br/><i>Myon-Toroid-Magnet</i></p> <p>12 Warm electromagnetic calorimeter<br/><i>warmes elektromagnetisches Kalorimeter</i></p> <p>13 Plug calorimeter (Cu, Si)<br/><i>Vorwärts-Kalorimeter</i></p> <p>14 Concrete shielding<br/><i>Betonabschirmung</i></p> <p>15 Liquid Argon cryostat<br/><i>Flüssig Argon Kryostat</i></p> |
|---|--|---|

Abbildung 1.2: Schematische Darstellung des H1-Detektors ([HER89]).

## 1.4 Der Strahluntergrund

Der Strahluntergrund stellt insbesondere im Bereich der Detektor-Spurenkammern eine Störungsquelle der Experimente dar und muß durch geeignete Abschirmmaßnahmen auf unkritische Werte herabgesetzt werden. Die Ursachen für strahlkorrelierten Untergrund sind:

- Durch Wechselwirkungen mit dem Restgas im Strahlrohr (*Beam-Gas-Wechselwirkungen*) gehen Strahlteilchen verloren (Der Restgasdruck beträgt etwa  $10^{-9}$  Torr).
- Die endliche laterale Ausdehnung der Bunche bewirkt einen Teilchenverlust durch Wechselwirkungen mit dem Strahlrohr (*Beam-Wall-Wechselwirkungen*).
- Durch die Beschleunigung des Elektronenstrahls und dessen Ablenkung durch Dipolmagnete entsteht *Synchrotronstrahlung*.

Verloren gegangene Strahlteilchen haben die Eigenschaft, Kaskaden von Sekundärteilchen (*Schauer*) zu bilden. Dies geschieht beim Durchgang durch die Strahlrohrwand, durch die Materie der Magnete, die das Strahlrohr umgeben, und in der Detektorabschirmung. Hadronenschauer erreichen mit mehreren Metern deutlich größere Eindringtiefen in Materie als elektromagnetische. Beachtung gilt der Myonenkomponente in den Schauern. Minimal ionisierende Myonen haben Reichweiten (Abb. 1.3),

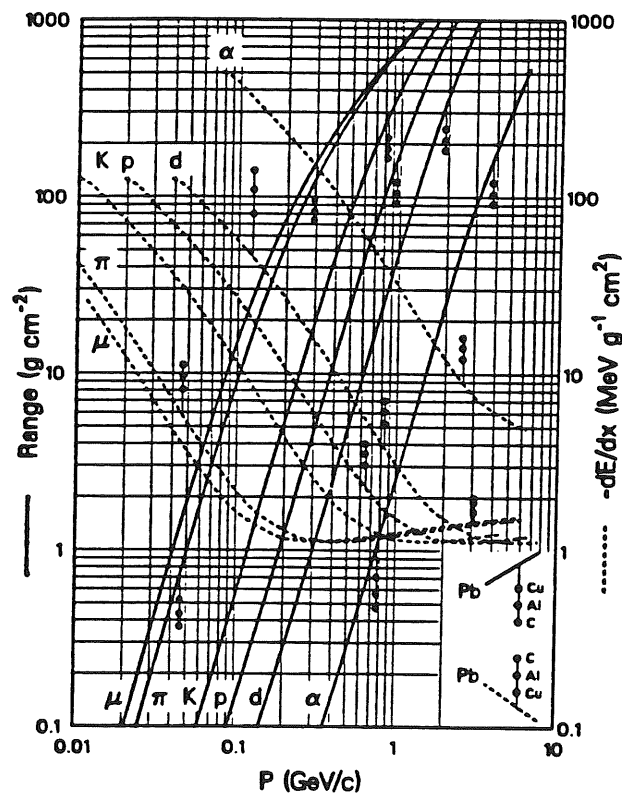


Abbildung 1.3: Mittlere Reichweite und mittlerer Energieverlust in Blei, Kupfer, Aluminium und Kohlenstoff berechnet mit der Bethe-Bloch-Formel (Gleichung 2.1 auf Seite 8) ([PDB90]).

die die Länge von Hadronenschauern um ein Vielfaches übersteigen können. Entlang gerader Strahlrohrstücke akkumulieren sich die verlorenen Strahlteilchen. Durch gezieltes Abstreifen an unkritischen Orten kann ein Teil des Untergrundes absorbiert werden, bevor er in die Nähe des Detektors kommt. Problematisch ist die Abschirmung des Untergrundes, der erst kurz vor oder innerhalb des Detektors entsteht. Im Unterschied zum Synchrotronstrahlungsuntergrund ließen sich die Teilchenverlustrate und der daraus hervorgehende Untergrund durch eine Verbesserung des Strahlrohrvakuums oder der Strahlfokussierung senken.

Eine einfache Abschätzung für die zu erwartenden Größenordnungen der mittleren Protonen- und Elektronenverluste pro Sekunde und Meter (Strahlrohr) läßt sich anhand folgender Überlegungen angeben: Für beide Teilchenstrahlen wird eine Lebensdauer (das ist die Zeit innerhalb der die Anfangsintensitäten  $I(t=0)$  der Strahlen auf den  $1/e$ -ten Teil abgefallen sind) von etwa 10 Stunden angestrebt. Aus der Anzahl der Teilchen pro Bunch und der Bunchanzahl (Tabelle 1.1 auf Seite 3) ergibt sich, daß zur Zeit  $t=0$  etwa  $2.1 \cdot 10^{13}$  Protonen und  $7.35 \cdot 10^{12}$  Elektronen gespeichert sein werden. Die mittlere Teilchenverlustrate  $\bar{R}$  erhält man dann aus:

$$\bar{R} = \frac{\text{Teilchenanzahl}(t=0) \cdot (1 - \frac{1}{e})}{\text{Lebensdauer} \cdot \text{Ringumfang}} = \text{Teilchenanzahl}(t=0) \cdot 2.77 \cdot 10^{-9} \cdot \frac{1}{sm} \quad (1.2)$$

Für Protonen ergibt sich  $\bar{R}_P = 5.82 \cdot 10^4 s^{-1} m^{-1}$  und für Elektronen  $\bar{R}_e = 2.04 \cdot 10^4 s^{-1} m^{-1}$ . Ergebnisse von Simulationsrechnungen zum erwarteten Protonenuntergrund werden z.B. in [BRI87] angeführt.

## Kapitel 2

# Das Eisen-Szintillator-Kalorimeter

Der Nachweis von Teilchen wird durch Wechselwirkungsprozesse mit Materie vermittelt. Auslegung und Kenngrößen eines Teilchendetektors hängen von der speziellen Natur dieser Prozesse ab. Oberhalb von etwa 1 – 10 GeV werden bevorzugt Teilchenkalorimeter zur Messung kinetischer Energien eingesetzt, da sich deren relatives Energieauflösungsvermögen proportional zu  $1/\sqrt{E_{Beam}}$  mit zunehmender Energie verbessert. In diesem Kapitel werden, nach einer Einführung in die Wechselwirkung von Strahlung mit Materie, der Aufbau und die Eigenschaften des für die Strahluntergrundmessungen eingesetzten Eisen-Szintillator-Kalorimeters beschrieben und einige ältere Messergebnisse referiert. Im dritten Kapitelabschnitt wird die im Rahmen dieser Diplomarbeit durchgeführte relative Nacheichung des Kalorimeters mit kosmischen Myonen beschrieben.

### 2.1 Wechselwirkung von Strahlung mit Materie

Durch elektromagnetische Wechselwirkung erleiden Teilchen beim Durchqueren von Materie einen Energieverlust. In einem Detektor wird dieser Effekt zur Generierung eines meßbaren Signals genutzt. Ungeladene Teilchen wie Neutronen,  $\pi^0$ -Mesonen und Photonen können durch geladene Zerfalls- bzw. Reaktionsprodukte nachgewiesen werden.

- Der mittlere durch *Ionisation* verursachte Energieverlust geladener Teilchen, deren
  1. Geschwindigkeit größer ist als die orbitaler Elektronen; für die
  2. der Energieverlust durch Synchrotronstrahlung vernachlässigbar ist und die
  3. keine Elektronen sind

wird näherungsweise durch die *Bethe-Bloch-Formel* ([PDB90]) beschrieben :

$$-\frac{dE}{d(\rho x)} = 2\pi N_A r_e^2 c^2 \frac{Z}{A} \frac{z^2}{\beta^2} \left( \ln \frac{2m_e c^2 \beta^2 \gamma^2 E_{max}}{I^2} - 2\beta^2 - \delta \right) \quad (2.1)$$

$$\text{mit : } 2\pi N_A r_e^2 c^2 = 0.1535 \text{ MeV cm}^2 / g$$

Die in Gleichung 2.1 verwendeten Symbole bedeuten:

|       |   |
|-------|---|
| $N_A$ | Avogadrozahl  |
| $r_e$ | klassischer Bohrscher Radius, dessen Einführung den maßsystemabhängigen Zahlwert der Elementarladung aus der Formel eliminiert. |

$$r_e = 4\pi\epsilon_0 \frac{\hbar^2}{e^2 m_e} \text{ (im SI-System) ; } r_e = \frac{\hbar^2}{e^2 m_e} \text{ (im Gauß-System)}$$

$\rho, Z, A$  Dichte, Kernladungs-, und Atommassenzahl des Absorbermaterials.

$z, \beta(v), \gamma(v)$  Ladungszahl und Geschwindigkeit  $v$  des Projektils,

$$\beta = \frac{v}{c} \quad \text{und} \quad \gamma = \frac{1}{\sqrt{1 - \beta^2}} .$$

$E_{max}$  ist der kinematisch maximal mögliche Energieübertrag des Projektils bei einer Frontalkollision mit einem Elektron des Detektormaterials.

$$\text{Es gilt } E_{max} = 2m_e c^2 \beta^2 \gamma^2 \text{ für } M_{Proj.} \gg m_e$$

$I$  das mittlere Ionisationspotential läßt sich empirisch annähern durch  $I = 16Z^{0.9} \text{ eV}$  für  $Z > 1$ .

$\delta$  ist ein Korrekturfaktor, der Polarisations- und Abschirmungseffekte berücksichtigt, die von der Dichte des Detektormaterials (Dichteeffekt) und der Projektilgeschwindigkeit abhängen.

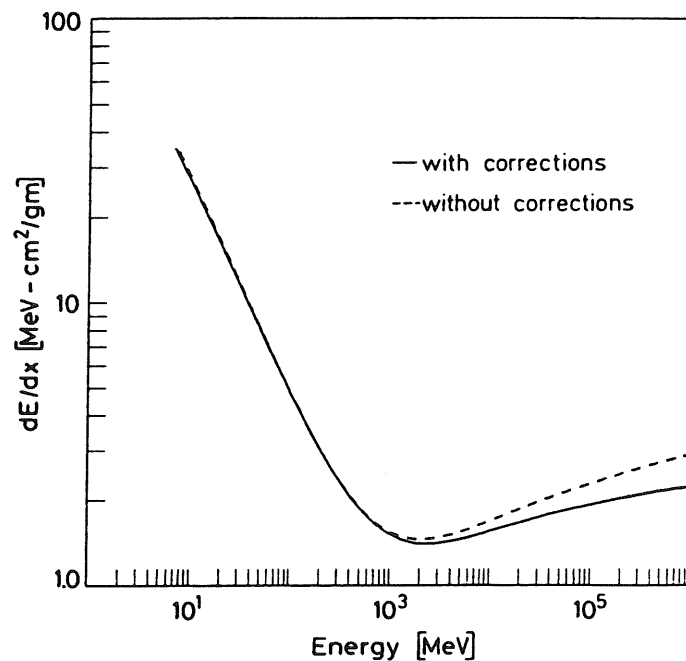


Abbildung 2.1: Energieverlust durch Ionisation in Kupfer berechnet nach Bethe-Bloch ([LEO87]).

Für Projektilgeschwindigkeiten oberhalb von  $cz/137$  fällt  $|dE/d(\rho x)|$  proportional zu  $1/\beta^2$  ab und nach einem breiten fast materialunabhängigen Minimum bei  $\gamma = E/M_{Proj.}c^2 \approx 3.2$  wird der Anstieg für  $\gamma > 4$  durch  $\ln \gamma$  bestimmt. Relativistische Teilchen, deren Energieverlustrate in der Nähe des Minimums ( $\gamma \approx 3 - 6$ ) liegt, werden als *minimal ionisierend* bezeichnet.

- **Bremsstrahlung** im elektrischen Feld der Atomkerne:

Die Emissionswahrscheinlichkeit für Bremsstrahlung ist umgekehrt proportional zur vierten Potenz der Teilchenmasse und damit praktisch nur für Elektronen (bzw. Positronen) relevant. Die *kritische Energie*  $E_c$  ist diejenige Energie, bei der der Energieverlust durch Bremsstrahlung gleich

dem durch Ionisation ist. Für Elektronen wird die Materialabhängigkeit von  $E_c$  beschrieben durch ([KLE87]):

$$E_c \approx \frac{580}{Z} \cdot \text{MeV} \quad (2.2)$$

Weit oberhalb von  $E_c$  im relativistischen Grenzfall kann die Ionisation gegenüber der Bremsstrahlung vernachlässigt werden. Der Energieverlust ist dann gegeben durch ([KLE87]):

$$\left(\frac{dE}{dx}\right)_{\text{Brems}} = -\frac{E}{X_0} \quad (2.3)$$

Die mittlere Energie  $\langle E \rangle$  eines Elektronenstrahles als Funktion der Eindringtiefe  $x$  ergibt sich daraus zu:

$$\langle E \rangle = E_0 \exp\left(-\frac{x}{X_0}\right) \quad (2.4)$$

Die *Strahlungslänge*  $X_0$  erhält in diesem Grenzfall die Bedeutung einer Schichtdicke, nach deren Durchquerung die mittlere Elektronenstrahlenergie auf 1/e-ten Teil abgefallen ist.

|                          | $Z$ | $A$    | $\rho[\text{g}/\text{cm}^3]$ | $E_c[\text{MeV}]$ | $X_0[\text{cm}]$ | $\lambda_{\text{int}}[\text{cm}]$ | $\left(\frac{dE}{d(\rho x)}\right)_{\text{min}} [\text{MeV cm}^2/\text{g}]$ |
|--------------------------|-----|--------|------------------------------|-------------------|------------------|-----------------------------------|---|
| Eisen                    | 26  | 55.85  | 7.87                         | 24                | 1.76             | 16.76                             | 1.48  |
| Kupfer                   | 29  | 63.55  | 8.96                         |                   | 1.43             | 15.06                             | 1.44  |
| Blei                     | 82  | 207.19 | 11.35                        | 6.9               | 0.56             | 17.09                             | 1.13  |
| Uran                     | 92  | 238.03 | $\approx 18.95$              |                   | $\approx 0.32$   | $\approx 10.5$                    | 1.09  |
| Abschirmbeton            |     |        | 2.5                          |                   | 10.7             | 39.96                             | 1.70  |
| Polystyrene <sup>1</sup> |     |        | 1.032                        |                   | 42.4             | 79.46                             | 1.95  |

Tabelle 2.1: Atomare und nukleare Materialeigenschaften ([PDB90]).

### 2.1.1 Elektromagnetische Schauer

Hochenergetische Elektronen und Photonen erzeugen in Materie Teichenkaskaden bzw. -schauer, bestehend aus Elektronen, Positronen und Photonen. Elementarprozesse der Schauerentwicklung sind Bremsstrahlung und  $e^+e^-$ -Paarerzeugung ( $E_\gamma > 2m_e c^2$ ) in der Nähe von Atomkernen (Impulserhaltung). Charakteristische Größen elektromagnetischer Schauer sind die *Strahlungslänge*  $X_0$ , die *kritische Energie*  $E_c$  und die *Moliere-Länge*  $R_M$  ([KLE87]):

$$R_M = 21 \frac{X_0}{E_c} \cdot \text{MeV} \quad (2.5)$$

$X_0$  ist die natürliche Einheit der longitudinalen Ausdehnung eines hochenergetischen Schauers, dessen Entwicklung abbricht, nachdem sekundäre Elektronen und Positronen die kritische Energie erreicht haben, unterhalb welcher der Energieverlust durch Ionisation vorherrscht. In allen Materialien hat das transversale Schauerprofil einen Radius von etwa 3 *Moliere* (99% Energiedeposition) ([KLE87]). Die Untersuchung der elektromagnetischen Schauerentwicklung liefert folgende Aussagen ([PER87]):

1. Die longitudinale Schauerausdehnung  $L_{\text{maz}}$  nimmt logarithmisch mit  $E_{\text{Beam}}$  zu:

$$L_{\text{maz}} \approx X_0 \frac{\ln\left(\frac{E_{\text{Beam}}}{E_c}\right)}{\ln 2} \quad (2.6)$$

<sup>1</sup>Typischer Szintillator

2. Die Anzahl der Teilchen im Schauermaximum ist proportional zu  $E_{Beam}$ .
3. Die integrierte Spurlänge aller Elektronen und Positronen des Schauers ist proportional zu  $E_{Beam}$ .

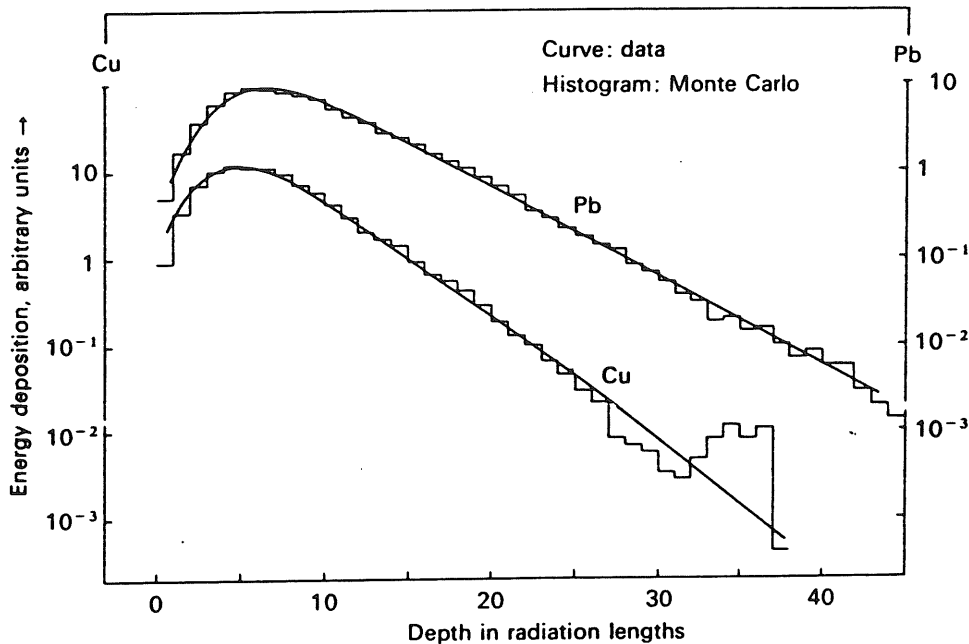


Abbildung 2.2: Longitudinale Verteilung der Energie elektromagnetischer Schauer in Kupfer und Blei ( $E_{Beam} = 6 \text{ GeV}$ ) ([PER87]).

Die Auswahl von Materialien mit großer Kernladungszahl  $Z$  — die Wirkungsquerschnitte für Bremsstrahlung und Paarerzeugung sind proportional zu  $Z^2$  — und damit kleiner Strahlungslänge  $X_0$ , erlaubt den Bau von kompakten Detektoren für elektromagnetische Schauer.

### 2.1.2 Hadronische Schauer

Hochenergetische Hadronen erzeugen in Materie durch inelastische Stöße mit Atomkernen sekundäre Hadronen — meist Pionen — welche ihrerseits inelastisch wechselwirken und weitere Generationen von Hadronen erzeugen und so zur Ausbildung *hadronischer Schauer* beitragen. Die Schauerentwicklung bricht ab, sobald die Energie der Sekundärteilchen nicht mehr zur Erzeugung neuer Teilchen ausreicht. Die longitudinale und transversale Schauerentwicklung wird in Einheiten der *nuklearen Wechselwirkungslänge*  $\lambda_{int}$  gemessen. Einige Zahlenwerte sind in Tabelle 2.1 zu finden. Für schnelle Übersichtsrechnungen eignet sich Gleichung 2.7 ([PDB90]):

$$\lambda_{int} \approx \frac{35A^{\frac{1}{2}}}{\rho} \cdot \text{gcm}^{-2} \quad (2.7)$$

Für das verwendete Eisen-Szintillator-Kalorimeter läßt sich eine Parametrisierung der Länge angeben, innerhalb der 95% der Schauerenergie deponiert werden ([KLE87]):

$$L(95\%) = (9.4 \ln E(\text{GeV}) + 39) \cdot \text{cm Fe} \quad (2.8)$$

Die transversale Schauerentwicklung (Deponierung von 95% der Energie) lässt sich etwa durch einen Radius von der Größenordnung  $\lambda_{int}$  charakterisieren. Hadronische Schauerdetektoren sind, wie der Vergleich von  $X_0$  mit  $\lambda_{int}$  zeigt, deutlich größer als elektromagnetische. Typische Abmessungen für hadronische Eisen-Szintillator-Kalorimeter sind longitudinal  $2m$  Eisen (die Gesamtlänge des Kalorimeters hängt von der Anzahl und der Dicke der Szintillatorplatten ab) und transversal  $0.60m$  ([KLE87]).

|                                |                          | 10 GeV | 30 GeV | 100 GeV | 1000 GeV |
|--------------------------------|--------------------------|--------|--------|---------|----------|
| elektromagnetische<br>Schauer: | $L_{maz}[cm]:$           | 15.5   | 18.1   | 21.2    | 27.0     |
|                                | $L_{maz}/X_0:$           | 8.7    | 10.3   | 12.0    | 15.3     |
| hadronische<br>Schauer:        | $L(95\%)[cm]:$           | 60.6   | 71.0   | 82.3    | 104.0    |
|                                | $L(95\%)/\lambda_{int}:$ | 3.6    | 4.2    | 4.9     | 6.2      |

Tabelle 2.2: Longitudinale Dimensionen elektromagnetischer und hadronischer Schauer in Eisen. Die Zahlenwerte wurden für vier verschiedene Energien aus der allgemeinen Gleichung 2.6 und der speziell für das Eisen-Szintillator-Kalorimeter gültigen Gleichung 2.8 berechnet.

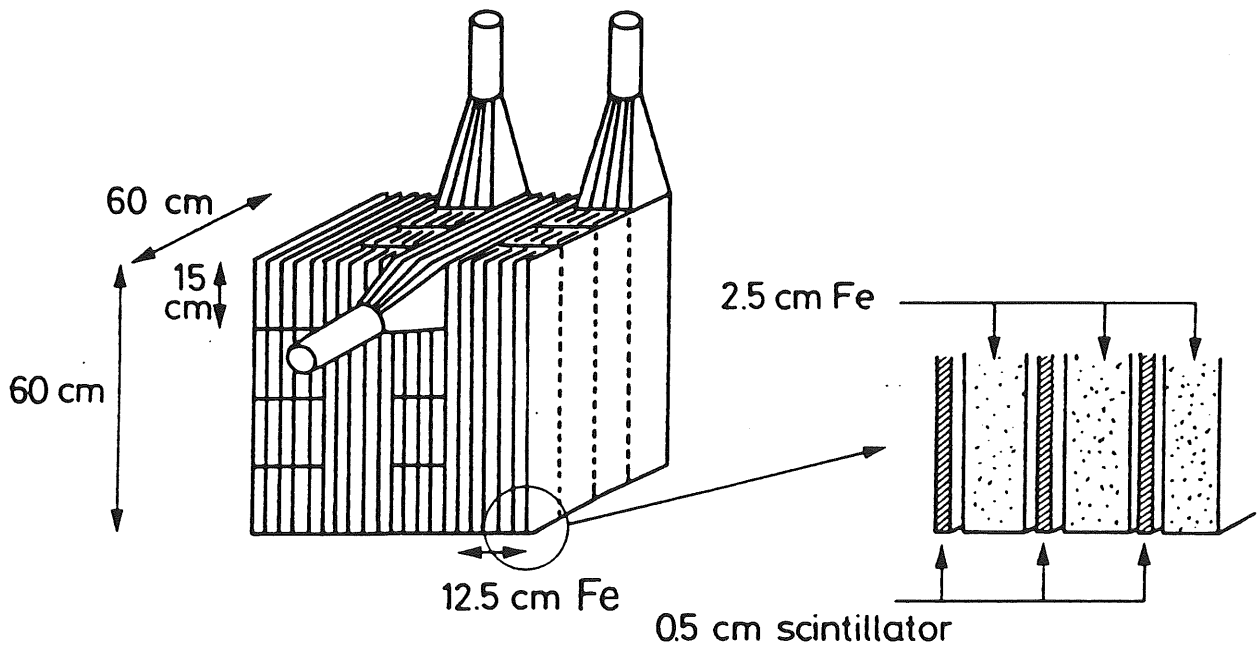


Abbildung 2.3: Detaillierte Struktur eines der Kalorimetermodule, die bei den Strahlungtergrundmessungen eingesetzt wurden ([ABR81]).



## 2.2 Beschreibung des Eisen-Szintillator-Kalorimeters

### 2.2.1 Struktur der Kalorimetermodule

Das hadronische Eisen-Szintillator-Kalorimeter besteht insgesamt aus vier gleich aufgebauten Modulen, von denen zwei, „Modul 2“ und „Modul 4“, bei den Strahluntergrundmessungen zum Einsatz kamen. Ein Modul (Abb. 2.3) besteht aus 16 Eisen-Szintillator-Sandwichstrukturen — jede einzelne hat eine Grundfläche von  $60\text{cm} \times 15\text{cm}$  und besteht aus einer Folge von fünf  $2.5\text{cm}$  starken Eisenplatten, denen jeweils eine  $0.5\text{cm}$  dicke Szintillatorplatte<sup>2</sup> folgt — und angekoppelten Lichtleitern welche das in den fünf Szintillatorplatten erzeugte Licht auf einen Photomultiplier<sup>3</sup> zusammenführen. Auf die Einheit aus Eisen-Szintillator-Sandwich, Lichtleiter und Photomultiplier wird im folgenden als *Zähler* oder *Kanal* Bezug genommen. Vier solcher Zähler sind nebeneinander in einer Ebene angeordnet und decken eine Fläche von  $60\text{cm} \times 60\text{cm}$  ab. In hintereinanderliegenden Ebenen sind die Zähler abwechselnd vertikal und horizontal orientiert.

### 2.2.2 Szintillatoren und Photomultiplier

*Szintillatoren* haben die Eigenschaft aus der beim Durchgang von ionisierender Strahlung deponierten Energie ein proportionales Lichtsignal zu generieren. Die Szintillation läuft in organischen und anorganischen Szintillatoren über verschiedene Prozesse ab.

Organische Plastikszintillatoren, auf die ich mich hier beschränken möchte, bestehen aus einem für sichtbares Licht transparenten Trägermaterial, welches als aktive Substanzen den eigentlichen Szintillator und in geringerer Konzentration den sog. *Wellenlängenschieber* enthält. Beide sind organische fluoreszierende Verbindungen, deren Grundstruktur häufig aromatische Ringe enthält und deren Eigenschaften durch delokalisierte Elektronensysteme bestimmt sind ([KLE87]).

Ionisierende Strahlung regt in organischen Szintillatoren Molekülzustände an, die in der Größenordnung von einigen Nanosekunden unter Emission von UV-Licht zerfallen. Der Wellenlängenschieber absorbiert das UV-Licht und reemittiert sichtbares Licht, für das der Szintillator hochtransparent ist. Das sichtbare Licht wird durch mehrfache Totalreflexion durch den Szintillator und über einen Lichtleiter auf die Kathode eines *Photomultipliers* (Sekundärelektronenvervielfacher) geführt. Photonen lösen durch Photoeffekt Elektronen aus der Kathode heraus; als Kathodenmaterial werden wegen der geringen Austrittsarbeit Alkalimetalle verwendet. Die Primärelektronen werden durch elektrische Felder auf die erste einer Folge von bis zu 14 Elektroden (sog. *Dynoden*) beschleunigt, aus der jedes Elektron etwa 4 Sekundärelektronen herauslöst, welche ihrerseits auf die nächste Dynode beschleunigt werden. Über die gesamte Dynodenreihe lassen sich Vervielfachungs- bzw. Verstärkungsfaktoren von etwa  $10^8$  erreichen. Ein Photomultiplier wird mit Hochspannungen von typisch  $1500 - 2000\text{V}$  betrieben ([PER87]). Über einen Spannungsteiler werden die Potentiale zwischen den einzelnen Dynoden aufgebaut. Das Ausgangssignal eines Photomultipliers ist ein negativer Ladungs- bzw. Spannungspuls, der im Idealfall proportional zur im Szintillator deponierten Energie ist. Der Spannungsteiler ist so auszulegen, daß der Querstrom durch die Teilerwiderstände groß gegenüber dem Dynodenstrom ist, denn insbesondere zwischen den letzten Dynoden, wo die Elektronenkaskade ihr Maximum erreicht, kann ein Spannungszusammenbruch zu Abweichungen vom linearen Verstärkungsverhalten des Photomultipliers führen. Als Kenngrößen sind zu nennen:

- Die *Lichtausbeute* im Szintillator ist ein Maß für die Umwandlungseffektivität von Ionisationsenergie in Photonen.
- Die *Selbstabsorptionslänge* des Szintillators. Die damit verbundene Ortsabhängigkeit des Photomultipliersignals kann zur Ortsmessung benutzt werden ist aber i.a. unerwünscht.
- Die *Quantenausbeute* der Photokathode, d.h. der Prozentsatz von Photonen, die Elektronen aus der Photokathode herauslösen. Die Quantenausbeute erreicht ein Maximum von etwa 25% bei Licht mit Wellenlängen von ungefähr  $400\text{nm}$  und kann durch Auswahl eines geeigneten Wellenlängenschiebers optimiert werden.

Lichtausbeute, Quantenausbeute und die Elektronenvervielfältigungsprozesse unterliegen statistischen Fluktuationen.

<sup>2</sup>Material: Plexipop 1922 (Röhme GmbH, Darmstadt)

<sup>3</sup>Typ: SRC L75B07 (SRC Laboratories, Fairchild, Connecticut, USA)

### 2.2.3 Funktionsweise des Kalorimeters, Eichung und Überwachung

Das Kalorimeter ist nach dem Sampling-Prinzip konstruiert. Die Eisenschichten bewirken eine räumlich konzentrierte Aufschauering und absorbieren den größten Teil der Energie. Das Kalorimeterausgangssignal wird von den dazwischenliegenden Szintillatorplatten geliefert, zu dem nur der Energieverlust durch *Ionisation* beiträgt, den geladene Schauerteilchen in den Szintillatorplatten erleiden (Das entspricht etwa 3 – 4% der Gesamtenergie  $E_{Beam}$ ). Die erzeugten Photonen werden mit Hilfe von Photomultipliern in elektrische Signale umgewandelt und man erwartet, daß die von den Einzelkanälen gelieferten Signale proportional zur lokalen Anzahl von Teilchenspuren sind, welche die Szintillatoren kreuzen. Die Verwendung von Eisen als Absorbermaterial für hadronische Schauerkalorimeter hängt mit der günstigen Wechselwirkungslänge  $\lambda_{int}$  (Tabelle 2.1), der im Vergleich zu Blei geringeren Dichte und der besseren Formstabilität zusammen.

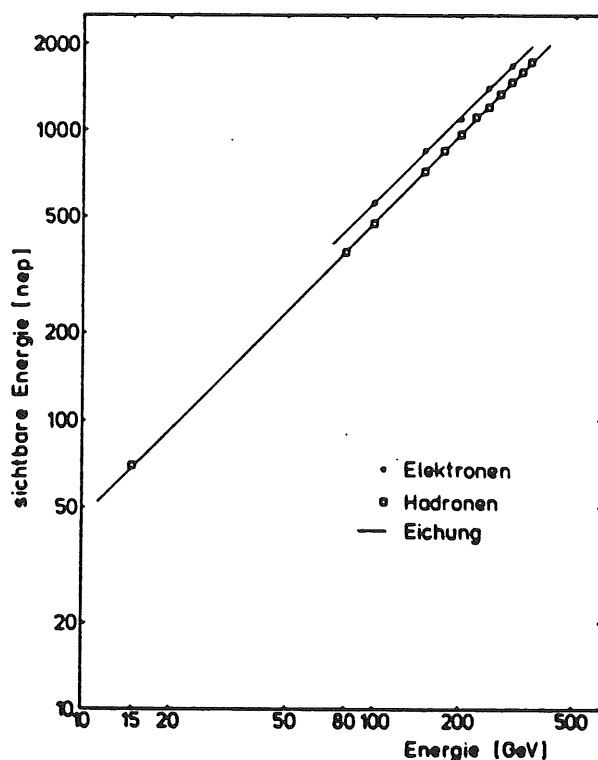


Abbildung 2.4: Proportionalität zwischen sichtbarer Energie und Primärenergie für das verwendete Kalorimeter ([KLE87]).

Die Kalorimetereichung wird in zwei Schritten durchgeführt. Vor der absoluten Eichung mit Teilchenstrahlen verschiedener Energien ist eine relative Eichung der einzelnen Kanäle mit minimalionisierenden Myonen erforderlich. Myonenstrahlen lassen sich beim Betrieb von Beschleunigerringen erzeugen. Vor einer neuen Befüllung werden die im Ring verbliebenen Teilchen auf einen Absorber gelenkt (*Beam-Dump*). Die Myonenkomponente der entstehenden Schauer wird nicht vollständig absorbiert und bildet hinter dem Absorber einen Myonenstrahl. Eine natürliche Myonenquelle stellt die kosmische Strahlung dar. Zur relativen Eichung des Kalorimeters wird ein Trigger installiert, der es erlaubt nur Signale von Myonen zu registrieren, die das ganze Kalorimeter parallel zu dessen longitudinaler Achse durchqueren. Die analogen Photomultipliersignale werden digitalisiert und für jeden Kanal in einem Pulshöhenspektrum ausgewertet. Die Verteilung der Pulshöhen (Abb. 2.9 auf Seite 19 zeigt ein Beispiel) wird als *Landauverteilung* bezeichnet und läßt sich aus den physikalischen Vorgängen im Szintillator ableiten. Der wahrscheinlichste Energieverlust minimal ionisierender Myo-

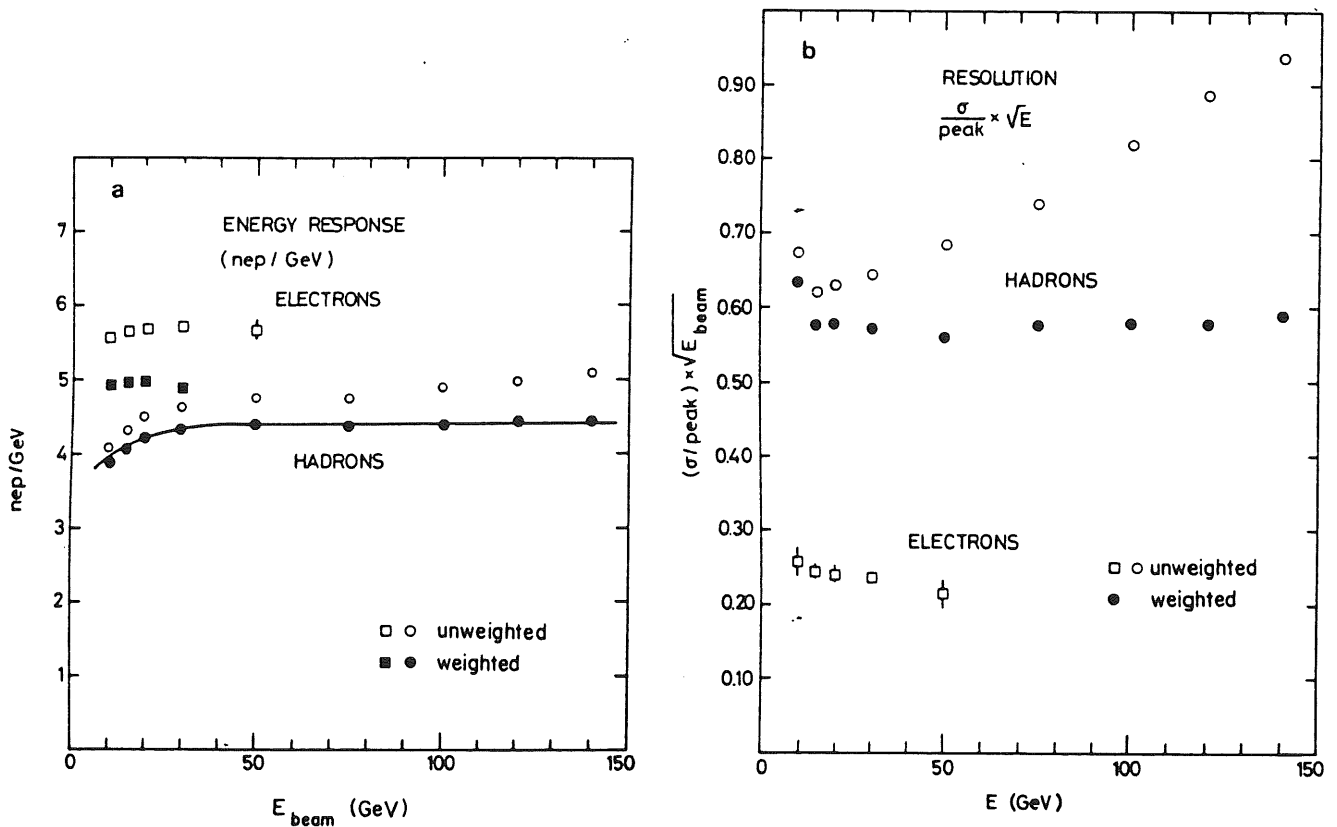


Abbildung 2.5: a) Energie-Response des Kalorimeters für Elektronen und Hadronen als Funktion von  $E_{Beam}$ . b) Energieauflösung (siehe Gleichung 2.10 auf Seite 17 für  $t = const.$ ).

nen ist durch den Peak der Verteilung bestimmt und definiert für jeden Einzelkanal die *Energieeinheit EP* ( $EP = \text{Equivalent Particle(s)}$ ). In einigen Abbildungen wird auch *NEP* für „Number of . . .“ verwendet). Der Wert des wahrscheinlichsten Energieverlustes ist sehr stabil gegenüber Schnitten in den Pulshöhenspektren, zeigt eine wesentlich geringere Energieabhängigkeit als der mittlere Energieverlust und zeichnet sich durch eine hohe Reproduzierbarkeit aus ([BLÜ82]). Die in den einzelnen Kanälen gemessene *sichtbare Energie* eines Teilchenschauers wird in Vielfache der individuellen Eichkonstanten umgerechnet und dann über das ganze Kalorimeter addiert. Fertigungs- und schädigungsbedingte Unterschiede zwischen den Kanälen, wie:

1. Szintillatorempfindlichkeit,
2. optischer Kontakt zwischen Szintillator, Lichtleiter und Photomultiplier,
3. Verstärkungsfaktoren der Photomultiplier,

werden mit dieser Methode eliminiert. Die Überwachung der Eichung läßt sich mit Myonenstrahlen oder durch eingebaute Quellen, z.B. Leuchtdioden realisieren. Bei den Testmessungen am CERN ([BLÜ82]) konnte gezeigt werden, daß die im Kalorimeter gemessene sichtbare Energie proportional zu  $E_{Beam}$  ist, wenn der Schauer vollständig absorbiert wird (Abb. 2.4). Ziel der absoluten Eichung ist die Bestimmung der *Energie-Response* (Abb. 2.5), d.h. der Anzahl äquivalenter Teilchen, die das Kalorimeter pro 1GeV registriert.

Weitere Testmessungen ([BLÜ82]) ergaben, daß sich die Response für Elektronen und Hadronen unterscheidet (Abb. 2.6). Das Verhältnis  $NEP/GeV$  wird für Hadronen mit zunehmender Primärenergie  $E_{Beam}$  größer, was sich auf einen wachsenden,  $\pi^0$ -induzierten elektromagnetischen Schaueranteil zurückführen läßt, und sich durch lokal überdurchschnittlich hohe Energiedeposition in wenigen Kanälen bemerkbar macht. Durch ein Wichtungsverfahren („Weighting“), das den Einfluß elektromagnetischer Schauerkomponenten abschwächt, lassen sich eine nahezu energieunabhängige Response und eine verbesserte Energieauflösung (Abb. 2.5) für hadronische Schauer erreichen.

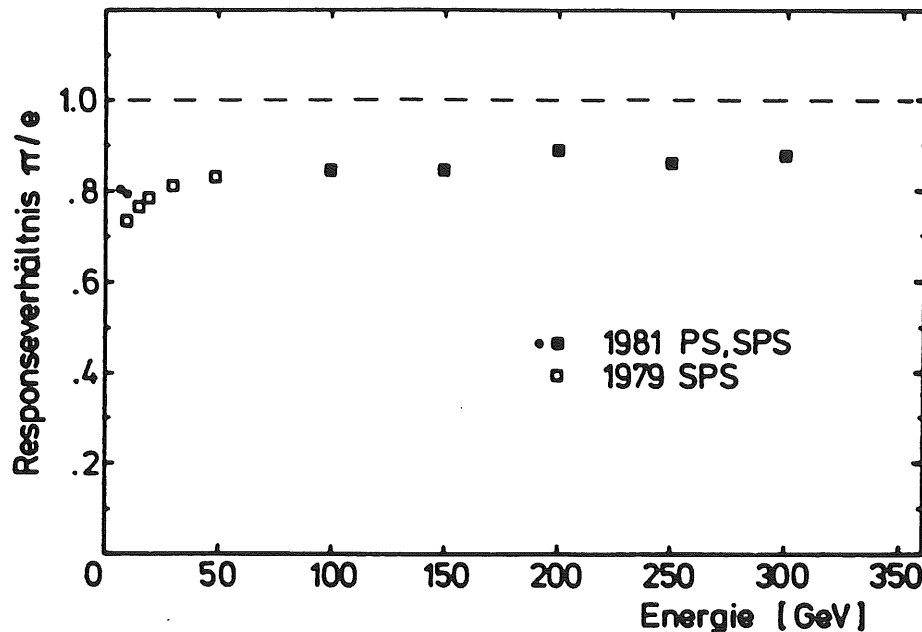


Abbildung 2.6: Verhältnis der sichtbaren Energien von Pionen und Elektronen gleicher Energie, (*Responseverhältnis* des Kalorimeters) ([KLE87]).

#### 2.2.4 Energieauflösungsvermögen

Die relative Energieauflösung des Kalorimeters — definiert als der Quotient aus Standardabweichung und Mittelwert des Ausgangssignals  $\frac{\sigma_E}{\langle E \rangle}$  — wird durch eine Reihe von Fluktuationsquellen beeinflusst:

- Schauerteilchenanzahl
- Photoelektronenanzahl
- Herauslecken des Schauers aus dem Kalorimeter, bedingt durch dessen endliche Größe.
- Sampling-Fluktuationen: Die Signalentnahme in Stichproben liefert den größten Beitrag zur Auflösung. Die sichtbare Energie  $E$  ist proportional zur Länge der Spuren geladener Teilchen in den Szintillatorplatten. Dividiert man diese Weglänge durch die Dicke der Szintillatorplatten, so erhält man die Anzahl  $N$  der Durchquerungen, welche proportional zu  $E_{Beam}$  und umgekehrt proportional zur Dicke  $t$  der Absorberplatten ist.

$$E \propto N \propto \frac{E_{Beam}}{t} \quad (2.9)$$

Nimmt man an, daß die statistischen Fluktuationen in  $N$  eine Poissonverteilung an ( $\sigma_N = \sqrt{N}$ ), so ergibt sich als Abschätzung für die relative Energieauflösung:

$$\frac{\sigma_E}{\langle E \rangle} \propto \frac{t^{\frac{1}{2}}}{\sqrt{E_{Beam}}} \quad (2.10)$$

- Splitting-Fluktuationen: Eine genauere Untersuchung zeigt, das sich  $E_{Beam}$  in einem hadronischen Schauer in verschiedene Komponenten aufteilt ([WEG89]):
  1. Ionisationsenergie geladener Teilchen,
  2. Elektromagnetische Schauer:  $\pi^0 \rightarrow 2\gamma$ ,
  3. Myonen: Da Myonen nicht aufschauern, kann ein endliches Kalorimeter nur einen Teil der entstandenen Myonenkomponente absorbieren,
  4. Neutronen, Neutrinos,
  5. Kernbindungseffekte wie Anregung und Spaltung: Niederenergetische Photonen oder Kernfragmente haben kleine Reichweiten und bleiben im Absorber stecken, ohne zur sichtbaren Energie beizutragen.

Fluktuationen des relativen Anteils der Komponenten hadronischer Schauer führen zu einem gegenüber elektromagnetischen Schauern verschlechterten Auflösungsvermögen. Die Messungen am CERN ergaben für die relative Energieauflösung des Kalorimeters ([BLÜ82]):

$$\text{für Elektronen: } \frac{\sigma_E}{\langle E \rangle} = \sqrt{\left(\frac{18.5\%}{\sqrt{E_{Beam}(GeV)}}\right)^2 + (1.8\%)^2} \quad (2.11)$$

$$\text{für Hadronen (mit Weightingkorrektur): } \frac{\sigma_E}{\langle E \rangle} = \sqrt{\left(\frac{57.9\%}{\sqrt{E_{Beam}(GeV)}}\right)^2 + (1.6\%)^2} \quad (2.12)$$

## 2.3 Relative Eichung des Kalorimeters mit kosmischen Myonen

Die am CERN durchgeführte absolute Eichung des Kalorimeters konnte übernommen werden. In diesem Abschnitt wird die am DESY durchgeführte relative Eichung mit kosmischen Myonen beschrieben, die vor der Durchführung der Strahluntergrundmessungen wiederholt werden mußte.

### 2.3.1 Meßaufbau

Zur Eichung wurden die einzelnen Kalorimetermodule auf die Seite gelegt, um von kosmischen Myonen mit optimaler Rate parallel zur longitudinalen Modulachse durchstrahlt zu werden. Myonen lieferten an den Multipliausgängen Spannungspulse mit Amplituden von etwa  $-5mV$ , die zur elektronischen Weiterverarbeitung zehnfach verstärkt wurden. Die verwendeten Verstärker hatten zwei äquivalente Ausgänge, die sich zum Aufbau eines Koinzidenztriggers für vertikal einfallende Myonen nutzen ließen. Der eine von den Verstärkern kommende Signalzweig wurde parallel für alle 16 Kanäle eines Kalorimetermoduls über Verzögerungskabel auf die Analog-Digital-Wandler (ADC) geleitet, der andere Zweig diente der Triggerbildung. Der Übergang zu logischen Schaltsignalen wurde durch Diskriminatoren realisiert, welche als Ausgangssignal eine logische „1“ liefern, sobald die Amplitude des Eingangssignals eine einstellbare Schwelle überschreitet. Mit Diskriminatorschwellen von  $-30mV$  (Dies war die dem Betrag nach niedrigste einstellbare Schwelle) wurde das Photomultiplierauschen unterdrückt, während Myonen ( $10 \times -5mV = -50mV$ ) einen Schaltimpuls auslösten. Die Diskriminatorausgangssignale der ersten und der vierten Kalorimetermodulebene wurden jeweils über ein logisches vierfach-ODER auf eine Koinzidenz (logisches UND) zusammengeführt. Mehrfachtriggerung wurde über eine

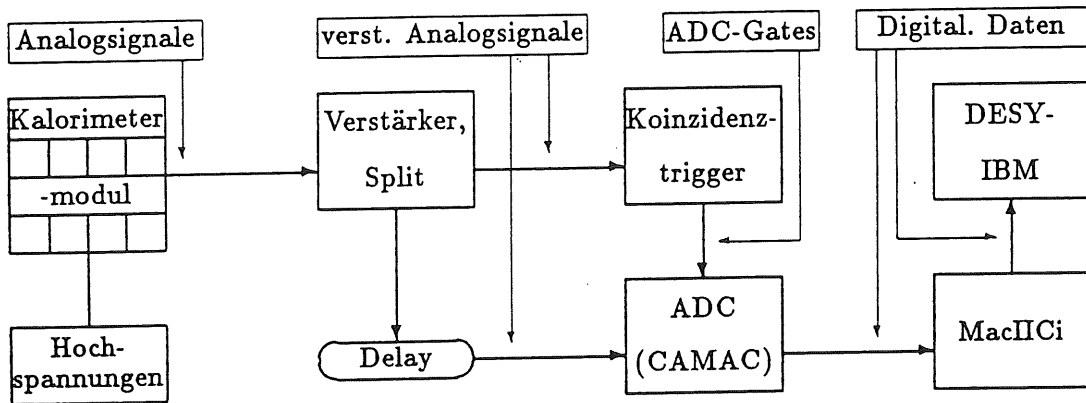


Abbildung 2.7: Signalerzeugung und elektronische Verarbeitung.

Rückkopplung des Koinzidenz Ausgangssignales auf deren Inhibit-Eingang unterbunden. Die gewählte Koinzidenzschaltung (Abb. 2.8) leistete eine grobe Vorwahl des Myoneneinfallswinkels. Die Triggerschaltung wurde mit elektronischen NIM-Bausteinen realisiert<sup>4</sup>. Typische Signallaufzeiten durch einzelne Bausteine liegen im Bereich von 5 – 15 ns. Zum Vergleich: Signallaufzeiten durch Koaxialkabel liegen bei 5 ns/m.

Die Triggerschaltung stellte als Ausgangssignal ein Zeitfenster (ADC-Gate) bereit, dessen Länge entsprechend der analogen Multiplierpulse zu 90 ns gewählt wurde und deren Digitalisierung durch ein CAMAC-System steuerte. In einem CAMAC-Crate können 24 Einschubmodule (z.B. ADC, Zähler, Input-, Outputregister, . . .) untergebracht werden, auf denen sich über ein Bussystem Lese- und Schreiboperationen und eine Reihe von Steuerfunktionen durchführen lassen. Über 64 Daten- und Steuerleitungen ließ sich das CAMAC-Crate von einem Personal-Computer (MacIIci) bedienen und auslesen. Alle CAMAC-Steuerprogramme<sup>5</sup> wurden in der Computersprache C verfaßt. Die Kommu-

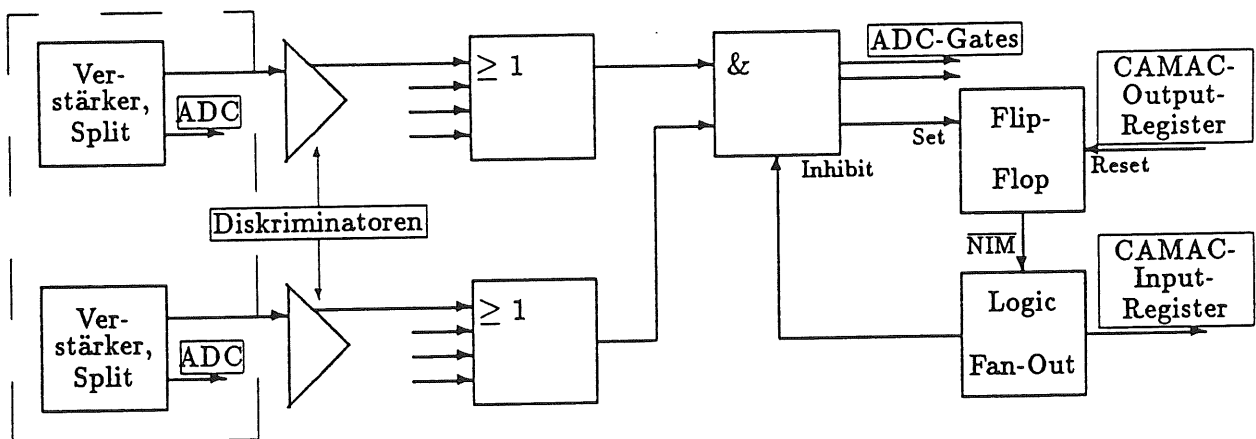


Abbildung 2.8: Triggerschaltbild.

<sup>4</sup>Die eingesetzten Bausteine erfüllen die Norm für „schnelle negative NIM-Logik“ (eine logische „0“ wird bei Verwendung von Signalkabeln mit einem Wellenwiderstand von 50Ω durch 0 V und eine „1“ durch -0.8 V realisiert) und lassen sich in einem NIM-Crate zu individuellen Schaltungen kombinieren.

<sup>5</sup>Autor aller CAMAC-Ausleseprogramme ist Chr. Leverenz ([LEV91]).

nikation zwischen Trigger und PC leisteten zwei CAMAC-Register: Ein *Bit* im Input-Register wurde laufend vom Programm abgefragt und leitete, wenn es gesetzt war, die Datenauslese ein. Ein nach deren Abschluß vom Programm gesetztes *Bit* im Output-Register gab den Trigger wieder frei. Nach jeder Datennahme wurden die auf der Festplatte des PC gespeicherten Datensätze mit einem File-Transfer-Protokoll (FTP) zum IBM-Großrechner vom DESY übertragen (Abb. 2.7). Dort wurden die Daten unter Einbeziehung des Analyseprogrammpakets LOOK ([BLO91]) mit Programmen ausgewertet, die in der Computersprache Fortran VS (Version Siemens) verfaßt wurden.

### 2.3.2 Auswertung der Eichdaten

Die verwendeten ADC<sup>6</sup> lieferten als Ergebnis der Digitalisierung die innerhalb des Zeitfensters in die Eingänge injizierte und von den Multipliern erzeugten Ladungen, bzw. dazu proportionale Zahlen („*Counts*“). Die 10*Bit*-Auflösung (0 – 1024 *Counts*) stand in einem Meßbereich von 0 – 256 *pC* zur Verfügung. Zur Eichung (Tabelle A.1 auf Seite 39) der ADC-Kanäle wurde die implementierte CAMAC-Testfunktion verwendet. Auf den Testeingang der ADC wurden nacheinander 12 Testspannungen gegeben und, nach einer Auftragung der Soll-Ladung gegen die in *Counts* gemessene Ladung, durch lineare Regression die Steigungen der Korrelationsgeraden bestimmt. Der Sollwert von 4 *Counts/pC* wurde um bis zu 7% unterschritten. Auf die Messungen hatte dies keinen negativen Einfluß, da es wesentlich auf die Linearität der ADC ankam. Als Maß für die Güte der Regression ergab sich aus der Summe der Fehlerquadrate eine typische Standardabweichung<sup>7</sup> von  $\sigma = 0.4 \text{ Counts}$ . Die

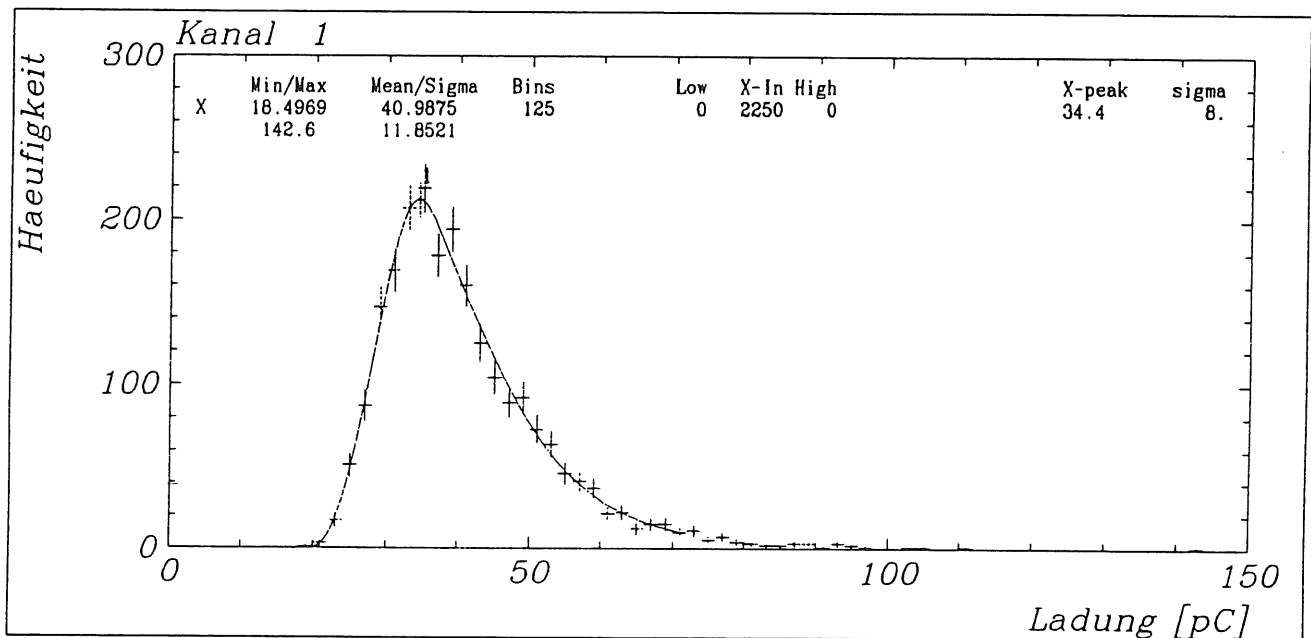


Abbildung 2.9: Pulshöhenspektrum minimalionisierender Myonen.

<sup>6</sup>Firma: LeCroy, Typ: LRS2249A

<sup>7</sup>Aus  $n$  Meßwerten  $y_i$  und der gefitteten Funktion  $f(x)$  erhält man  $\sigma$  aus:

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{(n-1)} \cdot \sum_{i=1}^n (y_i - f(x))^2} \quad (2.13)$$

Pedestals (einstellbare Nullpunkte) aller ADC-Kanäle wurden so justiert, daß sie für eine injizierte Ladung von  $0pC$  bei  $5 - 10\text{ Counts}$  lagen, da ein auf  $0\text{ Counts}$  eingestellter Pedestal nicht von einem im Negativen liegenden zu unterscheiden ist<sup>8</sup>. Die Pedestals, die von allen gemessenen Ladungen bei der Datenauswertung zu subtrahieren waren, wurden, soweit dies möglich war, nach einem Schnitt in den histogrammierten Rohdaten durch arithmetische Mittelung bestimmt und zeigten eine typische Breite<sup>9</sup> von  $\sigma \approx 0.8pC$ . Grundsätzlich wurden immer Datennahmen mit einem Zufallstrigger („Pedestalruns“) durchgeführt, da insbesondere Kanäle, die häufig zu einem Trigger beitragen, zu selten einen Pedestaleintrag in den Rohdaten liefern.

Aus den abgespeicherten Daten wurden mit einem Fortran-Programm Datensätze von Myonen ausgewählt, die alle vier Modulebenen annähernd parallel zur longitudinalen Modulachse durchquert hatten, d.h. durch einen von 16 sich aus der Segmentierung des Kalorimeters ergebenden Quadern mit einer Frontfläche von  $15\text{ cm} \times 15\text{ cm}$  und einer den vier Ebenen entsprechenden Tiefe von  $60\text{ cm}$ . Ein typischer Weglängenunterschied von 3% ergibt sich aus dem Vergleich der Spurlängen von Myonen, die die Quader parallel zu deren Kanten bzw. parallel zu deren Außenflächendiagonalen durchquert hatten. Von jeweils vier getroffenen Kanälen wurden die Pulshöhen in die entsprechenden Histogramme eingetragen. Die Peakpositionen der Verteilungen stellten die für jeden Kanal charakteristische Eichkonstante — die Energieeinheit  $EP$  („Equivalent Particle“) — dar. Durch Variation der Multiplierhochspannungen ließen sich die Eichkonstanten aneinander angleichen. Sie sollten sich um maximal 25% voneinander unterscheiden, damit alle Kanäle mit annähernd gleichem Gewicht zur Triggerbildung beitragen. Hierzu wurden die Hochspannungen so vorbestimmt, daß bei einer Diskriminatorschwelle von  $-30\text{ mV}$  alle Kanäle für kosmische Myonen etwa gleiche Zählraten lieferten. In einer feineren Abstimmung wurden die Spannungen anhand der Pulshöhenspektren um bis zu  $30\text{ V}$  nach oben bzw. unten korrigiert. Abbildung 2.9 zeigt ein typisches Pulshöhenspektrum für Kanal 1. Die Ergebnisse der Eichung sind in Tabelle 2.3 auf Seite 21 aufgeführt. Es bleibt festzustellen, daß die Abweichungen zwischen den einzelnen Eichkonstanten meist deutlich geringer als 25% sind.

---

<sup>8</sup>Ein ADC-Eintrag von  $0\text{ Counts}$  wird als „Underflow“, ein Eintrag von  $1024\text{ Counts}$  oder darüber wird als „Overflow“ bezeichnet.

<sup>9</sup>Ursache der relativ breiten Pedestals ist das Verstärkerrauschen.



| Kanal    | Hochspannung[ V] | Eichkonstante[pC] | $\sigma = \frac{FWHM}{2.3}[pC]$ |
|----------|------------------|-------------------|---------------------------------|
| Modul 2: |                  |                   |                                 |
| 0        | 1800             | 32.01 ± 0.22      | 9.99                            |
| 1        | 1740             | 34.43 ± 0.17      | 8.00                            |
| 2        | 1700             | 32.88 ± 0.17      | 7.59                            |
| 3        | 1650             | 34.75 ± 0.23      | 10.18                           |
| 4        | 1700             | 35.55 ± 0.26      | 11.39                           |
| 5        | 1625             | 32.99 ± 0.19      | 8.69                            |
| 6        | 1675             | 35.72 ± 0.20      | 9.02                            |
| 7        | 1750             | 31.23 ± 0.24      | 10.29                           |
| 8        | 1650             | 35.06 ± 0.23      | 9.73                            |
| 9        | 1675             | 31.32 ± 0.17      | 7.65                            |
| 10       | 1615             | 33.79 ± 0.19      | 8.27                            |
| 11       | 1740             | 32.43 ± 0.24      | 10.58                           |
| 12       | 1550             | 35.78 ± 0.22      | 9.43                            |
| 13       | 1750             | 36.23 ± 0.22      | 10.12                           |
| 14       | 1725             | 39.59 ± 0.24      | 11.29                           |
| 15       | 1700             | 36.49 ± 0.29      | 12.97                           |
| Modul 4: |                  |                   |                                 |
| 16       | 1860             | 29.67 ± 0.22      | 9.27                            |
| 17       | 1660             | 33.68 ± 0.21      | 9.35                            |
| 18       | 1575             | 33.71 ± 0.22      | 9.46                            |
| 19       | 1800             | 33.52 ± 0.21      | 9.20                            |
| 20       | 1750             | 33.40 ± 0.28      | 11.78                           |
| 21       | 1735             | 34.08 ± 0.24      | 10.87                           |
| 22       | 1860             | 34.40 ± 0.24      | 10.35                           |
| 23       | 1775             | 32.09 ± 0.24      | 10.22                           |
| 24       | 1610             | 32.69 ± 0.25      | 10.35                           |
| 25       | 1950             | 33.25 ± 0.21      | 9.15                            |
| 26       | 1625             | 33.74 ± 0.21      | 8.67                            |
| 27       | 1560             | 34.22 ± 0.24      | 10.77                           |
| 28       | 1675             | 35.14 ± 0.24      | 10.03                           |
| 29       | 1700             | 33.41 ± 0.25      | 11.10                           |
| 30       | 1750             | 33.86 ± 0.26      | 11.26                           |
| 31       | 1960             | 35.71 ± 0.27      | 11.39                           |

Tabelle 2.3: Ergebnisse der Kalorimetereichung. Die statistischen Fehler in der Peakposition wurden aus der effektiven Anzahl  $N$  der Einträge unter der Verteilung berechnet nach  $\sigma/\sqrt{N}$ .

## Kapitel 3

# Meßaufbau am H1-Wechselwirkungspunkt

Zur Durchführung der Strahluntergrundmessungen wurden zwei Kalorimetermodule an der Außenseite der HERA-Speicherringe in Strahlrohrhöhe neben dem H1-Wechselwirkungspunkt installiert. Als Abschirmung gegen Synchrotronstrahlung vom Elektronenstrahl wurden zwischen Strahlrohr und Kalorimeter eine 10cm dicke Bleimauer und auf der Elektronenseite ein 40cm dicker Betonblock aufgebaut. Auf der Protonenseite sollte eine 3m dicke Betonwand das „Final Shielding“ — geplante Abschirmmaßnahmen sowie instrumentiertes Eisen des H1-Detektors — simulieren.

Parallel zu den Kalorimetermessungen wurden Strahluntergrundstudien mit einem vorläufigen Aufbau der H1-Vetowand ([LEV91]) durchgeführt. Das „äußere“ und „innere“ Veto wurde jeweils von vier in Koinzidenz geschalteten Szintillationszählerpaaren gebildet, die um das Strahlrohr herum angeordnet waren. Ergänzt wurde der Meßaufbau der Vetowandgruppe durch zwei einzelne gegen Synchrotronstrahlung abgeschirmte Szintillationszähler zwischen Kalorimeter und Betonwand; außerdem wurde ein in Koinzidenz (100 cm<sup>2</sup> Überlappungsfläche) geschaltetes Szintillationszählerpaar auf der Protonenseite 20m vom Wechselwirkungspunkt entfernt neben dem Strahlrohr installiert („Tunnelkoinzidenz“). Abbildung 3.1 zeigt den Meßaufbau in einer Aufsicht.

### 3.1 Triggerlogik

Die Triggerlogik wurde, ausgehend von einem Koinzidenztrigger, durch einen Energieschwellentrigger<sup>1</sup> und einen „Multiplizitäten“-trigger ergänzt. Im folgenden werden die Elemente der in Abbildung 3.2 dargestellten Triggerschaltung beschrieben. Die Typenbezeichnungen der verwendeten Geräte sind in Tabelle 3.1 aufgeführt.

- (1) Hinter die Verstärker wurden sogenannte „High-Z“-Diskriminatoren geschaltet. Diese haben gegenüber herkömmlichen Diskriminatoren den Vorteil, daß sie das analoge Eingangssignal zur Erzeugung eines logischen Ausgangssignals hochohmig abtasten und danach unverändert wieder zur Verfügung stellen, wodurch eine Signalteilung vor den Diskriminatoren überflüssig wurde. Da von den Verstärkern nur noch ein Ausgang genutzt werden mußte, konnten sie zur Messung höherer Energien wahlweise aus der Schaltung entfernt werden, ohne das Timing ändern zu müssen, während mit Verstärkern, z.B. durch die Koinzidenzschaltung aller acht Kalorimeterebenen, auf Myonen getriggert werden konnte.
- (2) Veroderung von jeweils vier Kanälen einer Kalorimeterebene.

---

<sup>1</sup>Der Energieschwellentrigger wurde im Rahmen einer Diplomarbeit von U.Knecht aufgebaut.

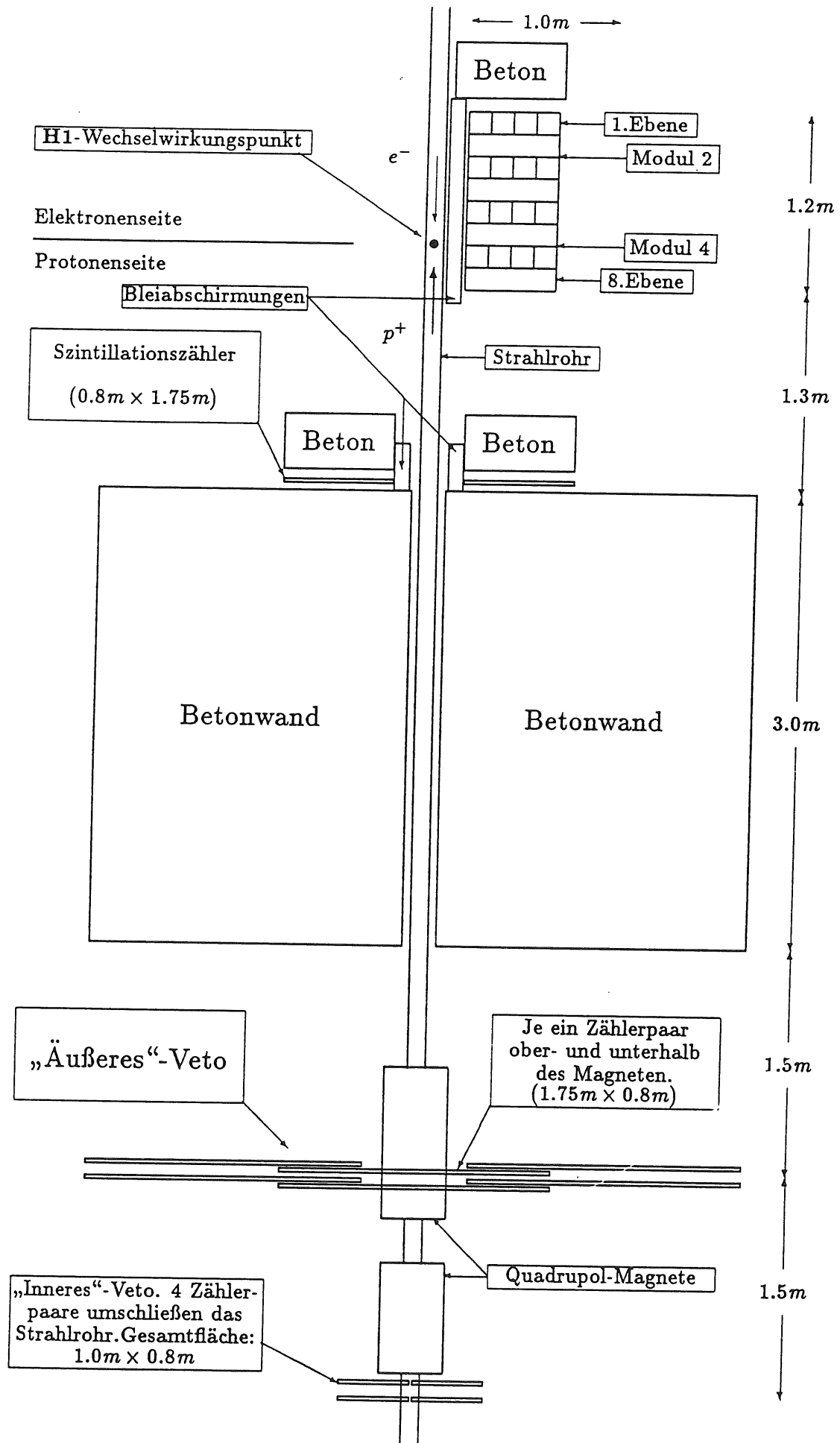


Abbildung 3.1: Meßaufbau in Halle Nord.

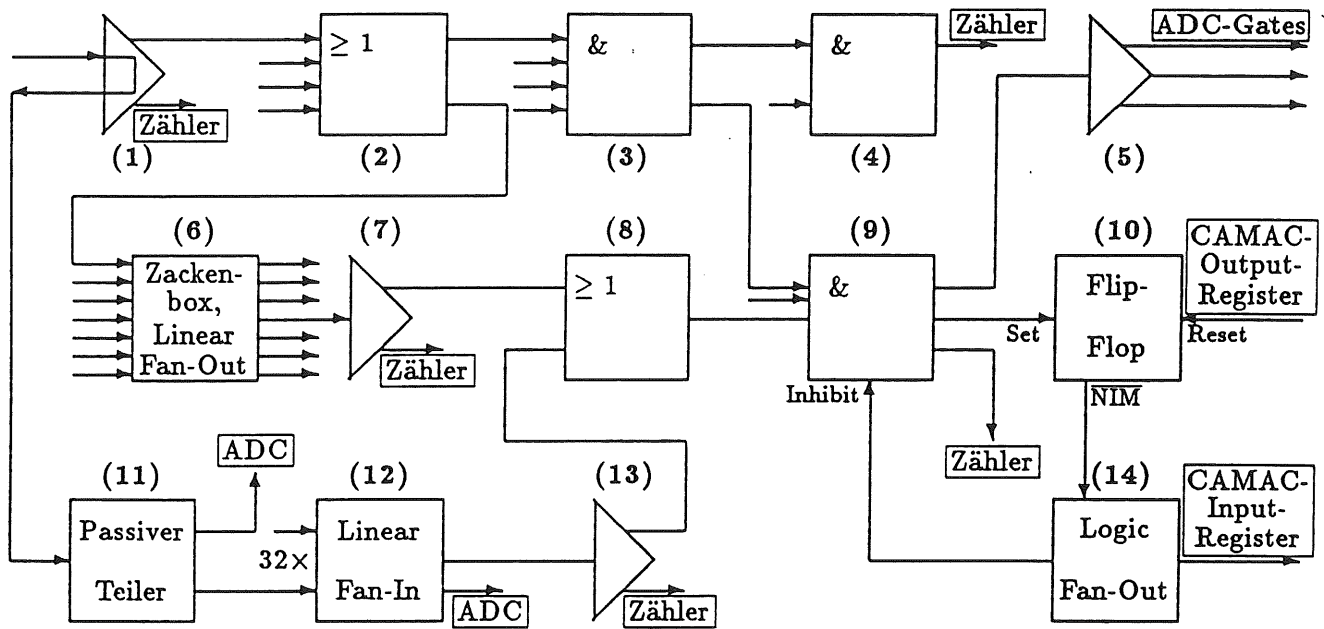


Abbildung 3.2: Triggerlogik.

- (3),(4),(9) Da die schaltbaren Koinzidenzen nur über vier Eingänge verfügen, ließ sich die Option auf eine Achtfachkoinzidenz aller Kalorimeterebenen nur durch eine zwei-stufige Schaltung realisieren. Über die Koinzidenz (4) ließ sich die tatsächliche Koinzidenzrate zählen, während über (9) die CAMAC-Ausleserate gezählt wurde. Das Verhältnis beider Raten ist ein Maß für die Totzeit des Triggers.
- (5) Diskriminator zur Bildung der ADC-Gates von  $90\text{ns}$  Länge.
- (6),(7) Um nur die Anzahl der triggernden Ebenen, nicht aber deren geometrischen Ort festzulegen, wurde ein Multiplizitäten-Trigger installiert, der bis zu sieben logische Eingangssignale verarbeiten konnte. Eine sogenannte „Zackenbox“ (6) erhielt die Triggersignale von sieben Kalorimeterebenen als Eingangssignale und lieferte abhängig von der Anzahl („Multiplizität  $M$ “) gleichzeitig anliegender „logischer Einsen“  $M \times 100\text{mV}$  als Ausgangsspannung. Mit zwei Linear Fan-Outs wurden sieben gleiche Ausgangsspannungen erzeugt, welche auf Diskriminatoren mit zwischen  $50$  und  $650\text{mV}$  gestaffelten Schwellen geführt wurden. Auf diese Weise ließ sich z.B. ein „mindestens vier von sieben Kalorimeterebenen“-Trigger schalten. Neben der Verwendung als Trigger lieferte das Zählen der Multiplizitäten Informationen über die Reichweite des Strahluntergrundes im Kalorimeter.
- (11),(12),(13) Der Aufbau eines Energieschwellentriggers ergänzte die Schaltung: Nach einer passiven Teilung (11) wurde der eine Signalzweig über Verzögerungskabel zu den ADC geführt. Nach einer Addition (12) aller 32 Signale des anderen Zweiges wurde die Summe auf einen Diskriminator (13) geführt, an dem sich eine Schwellenenergie einstellen ließ. Dies konnte zur Unterdrückung überhöhter Triggerraten genutzt werden.
- (8) Die Veroderung ermöglichte einen kombinierten Multiplizitäten-Energiesummen-Trigger, auf den an der Koinzidenz (9) umgeschaltet werden konnte.

|              | Funktion   | Typ (Firma: LeCroy) |
|--------------|--|---------------------|
| —            | Verstärker   | LRS612A             |
| (1)          | High-Z Diskriminatoren                                     | LRS623Z             |
| (2),(8),(14) | ODER (Logic Fan-In/Fan-Out)                                | LRS429, LRS429A     |
| (3),(4),(9)  | Koinzidenzen mit vier zuschaltbaren Eingängen              | LRS465, LRS466      |
| (5),(7),(13) | Diskriminatoren  | LRS623              |
| (6)          | „Zackenbox“  | —                   |
| (6),(12)     | Linear Fan-In/Fan-Out                                      | LRS428F             |
| (10)         | Gate-Generator im Latch-Mode                               | LRS222              |
| (11)         | Passive Teiler (6dB): 17Ω Widerstände in Dreiecksschaltung | —                   |

Tabelle 3.1: Geräteliste.

### 3.2 CAMAC-Auslesesoftware

Bei der Konzeption der CAMAC-Auslesesoftware mußte berücksichtigt werden, daß parallel für Vetowand und Kalorimeter mit einem gemeinsamen CAMAC-System Daten genommen werden sollten. Hinzu kam auch der Einsatz von CAMAC-Zählern zur Aufzeichnung von Zählraten. Die Kommunikation zwischen Triggerlogik und Datenauslesesoftware wurde über CAMAC-Input- und -Output-Register realisiert. Für Veto- und Kalorimetertrigger und für die Zähler wurden vom Ausleseprogramm nacheinander 3 *Bit*-Positionen im Input-Register abgefragt, im Falle eines gesetzten *Bits* die jeweiligen CAMAC-Module ausgelesen und danach im Output-Register das entsprechende *Bit* zur erneuten Triggerfreigabe gesetzt. Die Zählerausleserate wurde von außen über eine Schaltung aus Gategeneratoren auf eine Sekunde eingestellt, so daß die Zählraten direkt in *Hz* abgespeichert wurden (Die Belegung der ADC- und der Zählerkanäle ist Tabelle 3.2 zu entnehmen). Um schnell einen Überblick über die Funktionstüchtigkeit der Meßgeräte und eventuelle Strahlaktivitäten gewinnen zu können, wurden alle aktuellen Zählraten auf dem Bildschirm des PC ausgegeben.

Die ADC-Daten für Vetowand und Kalorimeter wurden in separaten Dateien abgespeichert. Die Namen für die Kalorimeterdateien wurden aus zwei achtstelligen durch einen Punkt getrennten Kennungen gebildet. Die ersten acht Zeichen enthielten das Datum des Datennahmestarts. Dem folgte der Identifier „KALO“ und eine vierstellige Dezimalzahl, die, beginnend bei „KALO0000“ eine Durchnummerierung der Dateien ermöglichte. Ein ADC-Datensatz hatte eine Länge von 76 *Bytes*. Auf den ersten 4 *Bytes* wurde das Datum des jeweiligen Events abgespeichert, die folgenden 72 *Bytes* wurden mit den Einträgen von 36 ADC-Kanälen belegt, wobei für jeden Kanal 2 *Bytes* vorgesehen wurden, die zur Darstellung der größtmöglichen Zahl (1024) ausreichten.

Zählraten wurden für Vetowand und Kalorimeter in gemeinsamen Dateien abgespeichert (Identifier „SCAL“). Ein Datensatz hatte eine Länge von 148 *Bytes* (später 388). Die ersten 4 *Bytes* enthielten wieder das aktuelle Datum, auf den folgenden Speicherplätzen wurden 72 (später 96) Zählraten abgelegt. Von den 24 *Bit* der CAMAC-Zähler ließen sich anfangs nur die unteren 16 *Bit* auslesen (Durch den Einsatz eines „Expanders“ wurden später auch die oberen 8 *Bit* zugänglich). Die *Computersprache C*, in der das Ausleseprogramm verfaßt war, stellt die Datentypen „unsigned long“ (4 *Byte* Integer ohne Vorzeichen) und „unsigned short“ (2 *Byte* Integer ohne Vorzeichen) zur Verfügung. Das aktuelle Datum wurde als „unsigned long“ abgespeichert, die Zählraten speicherplatzsparend als „unsigned short“ (mit Expander als „unsigned long“). Die *Computersprache Fortran*, mit der die Daten analysiert wurden, verfügt nicht über die genannten Datentypen und machte die Entwicklung von Konversionsprogrammen erforderlich.

| ADC-Kanal | Belegung            | Zähler <sup>3</sup> -Kanal | Belegung                   | Zähler-Kanal | Belegung   |
|-----------|---------------------|----------------------------|----------------------------|--------------|--|
| 0         | Kanal 0             | 0                          | Kanal 0                    | 84           | Multiplizität 1  |
| 1         | Kanal 1             | 1                          | Kanal 1                    | 85           | Multiplizität 2  |
| .         | .                   | .                          | .                          | .            | .  |
| .         | .                   | .                          | .                          | .            | .  |
| 26        | defekt <sup>2</sup> | .                          | .                          | .            | .  |
| .         | .                   | .                          | .                          | 90           | Multiplizität 7  |
| 31        | Kanal 31            | 31                         | Kanal 31                   | 91           | Raten<br>oberhalb<br>verschiedener<br>Energie-<br>schwellen. |
| 32        | Kanal 26            | 32                         | Trigger                    | 92           |  |
| 33        | Verschiedene        | 33                         | CAMAC-Rate                 | 93           |  |
| 34        | Teil-Energie-       | 34                         | Tunnelkoinz.               | 94           |  |
| 35        | summen.             | 35                         | Referenz-Frq. <sup>4</sup> | 95           |  |

Tabelle 3.2: Belegung der ADC-Eingänge und der Zähler.

Das CAMAC-Ausleseprogramm registrierte ständig die Zählraten. ADC-Daten wurden jedoch nur aufgezeichnet, sobald die Tunnelkoinzidenz eine Zählrate oberhalb von 10 Hz registrierte, was auf Strahlaktivitäten hinwies. Mit einer zweiten Programmversion ließen sich ständig Daten nehmen, um Informationen über den kosmischen Untergrund zu erhalten.

### 3.3 Offline-Analyse-Programmbibliothek

Zur Datenanalyse wurden im Rahmen dieser Diplomarbeit einige Unterprogramme in der Computersprache Fortran entwickelt:

1. Zur Dateieröffnung, um mehrere Dateien nacheinander in einer Programmschleife einlesen zu können.
2. Zur Datenkonversion der Zählraten.
3. Zur Datumskonversion, um das als „unsigned long“ abgespeicherte Datum in eine lesbare Zeichenkette umzuwandeln.
4. Zur Datumsrückkonversion, um aus den ADC-Daten und den Zählraten interessierende Zeitintervalle auswählen und die erforderlichen größer/kleiner-Vergleiche auf Integerbasis durchführen zu können.
5. Zur Overflowabfrage, um in den ADC-Daten Informationen über die betroffenen Kanäle und die Gesamtzahl der Overflows pro Datensatz zu erhalten.
6. Zur Umrechnung von ADC-Counts in  $pC$ , unter Verwendung der Ergebnisse der ADC-Eichung.
7. Zur Umrechnung von  $pC$  in  $EP$  (Equivalent Particles) unter Verwendung der Kalorimetereichkonstanten. Für jeden Kanal wurde die Möglichkeit eines individuellen Verstärkungs- bzw. Abschwächungsfaktors eingeräumt.

<sup>2</sup>Siehe auch Tabelle A.1 auf Seite 39.

<sup>3</sup>Drei 12 Kanal-Zähler vom Typ LRS2551. Die Kanäle 36 – 83 wurden von der Vetowandgruppe genutzt.

<sup>4</sup>Auf diesem Kanal wurde eine Referenzfrequenz aufgezeichnet, um die Stabilität des Zeitfensters in dem die Zählraten registriert wurden zu überwachen.

## Kapitel 4

# Untergrund des Elektronenstrahls bei 26.6GeV

Im Juli 1991 wurden an HERA Testläufe zur Injektion, Speicherung und Beschleunigung von Elektronen durchgeführt. Insbesondere gelang:

- Die Beschleunigung der Elektronen auf die Soll-Energie von 30GeV am Freitag den 19.7.91 und
- Die wiederholte Speicherung von 26.6GeV Elektronen über mehrere Stunden.

Während der Testläufe wurden bis zu 10 Elektronenbunche mit einem typischen Gesamtstrom von 2 – 3mA gespeichert. Der spätere Soll-Speicherstrom beträgt 60mA bei einer Bunchanzahl von 210.

### 4.1 Dosimeterauswertung

Um das Kalorimeter gegen Strahlenschädigungen durch intensive Synchrotronstrahlung vom Elektronenstrahl zu schützen, wurde es durch eine 10cm dicke Bleiwand (etwa 18 Strahlungslängen; siehe Tabelle 2.1 auf Seite 10) und einen 40cm dicken Betonblock abgeschirmt (etwa 4 Strahlungslängen). Zur Messung der Strahlenbelastung wurden für einen Zeitraum von 50 Tagen an vier Meßpunkten (Abb. 4.1) Dosimeter<sup>1</sup> in Strahlrohrhöhe angebracht. Neben der Abschirmwirkung des Betonblocks ist auch eine Radialabhängigkeit zu erkennen, die sich durch das stark in Vorwärtsrichtung ausgeprägte Intensitätsmaximum der Synchrotronstrahlung erklären läßt.

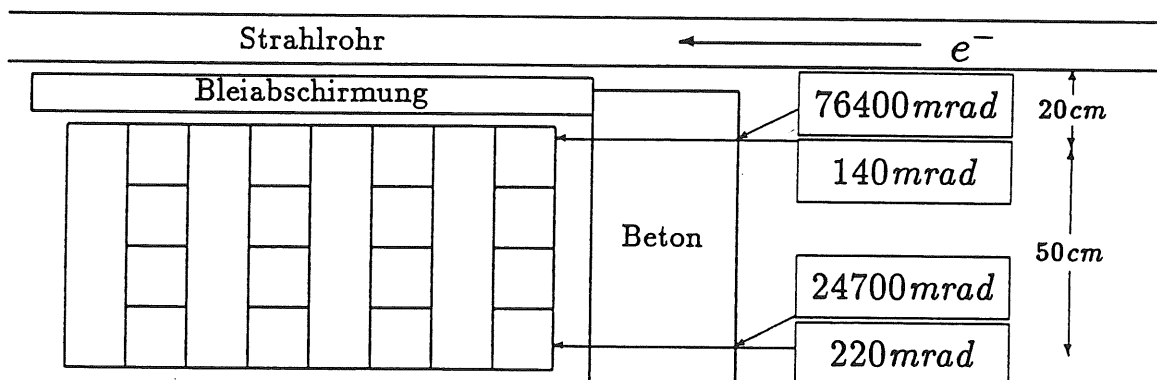


Abbildung 4.1: Ergebnisse der Dosimeterauswertung.

<sup>1</sup>Thermo-Lumineszenz-Dosimeter vom Typ SR 104

## 4.2 Zählraten

Die ständige Registrierung von Zählraten erwies sich als ein wichtiges Analyse-Instrument. Die Verlustrate eines gespeicherten Teilchenstrahls ist — unter jeweils konstanten Bedingungen — proportional zum gespeicherten Strom. Neben der Klärung der Fragen nach Injektionszeitpunkt, Speicherungs- und Strahllebensdauern konnte z.B. auch der Einfluß von Veränderungen in der Strahl-optik untersucht werden. In diesem und den folgenden Abschnitten werden wiederholt Daten von einem „Elektronenrun“ (Speicherung von 26.6 GeV Elektronen im Zeitraum von Sonntag den 21.7.91 um 21:34 Uhr bis zum nächsten Morgen um 6:34 Uhr) und einem reinen „Cosmicrun“, der nach Ende der Elektronenruns unter ansonsten gleichen Bedingungen aufgezeichnet wurde, gegenübergestellt. Eine zeitliche Übersicht über beide Runs gibt Abbildung 4.2, die die von der Tunnelkoinzidenz (100 cm<sup>2</sup>-Szintillatorüberlappungsfläche, ca. 20 cm Abstand zum Strahlrohr) registrierte Zählrate über einen Zeitraum von 9 Stunden zeigt. Es lassen sich drei weitgehend störungsfreie Speicherungsphasen erkennen. Die Absätze an den ansteigenden Flanken entsprechen der stufenweisen Beschleunigung des Elektronenstrahls. In Abbildung 4.3 sind alle 16 Einzelzählraten (Ein Kanal hat mit 15 cm × 60 cm = 900 cm<sup>2</sup> die 9-fache Fläche der Tunnelkoinzidenz) des hinter der Betonabschirmung aufgestellten Kalorimetermoduls 2 dargestellt. Da die Zählraten während des Elektronen- und des Cosmicruns ( $\approx 5$  Hz) von gleicher Größenordnung waren, konnten sie direkt gegenübergestellt werden. Die Kanäle 0 – 3 (1. Ebene) und 8 – 11 (3. Ebene) sind senkrecht orientiert; die Kanäle 0 und 8 haben die geringste Entfernung zum Strahlrohr. Die Kanäle 4 – 7 (2. Ebene) und 12 – 15 (4. Ebene) sind horizontal orientiert und von oben nach unten durchnummeriert.

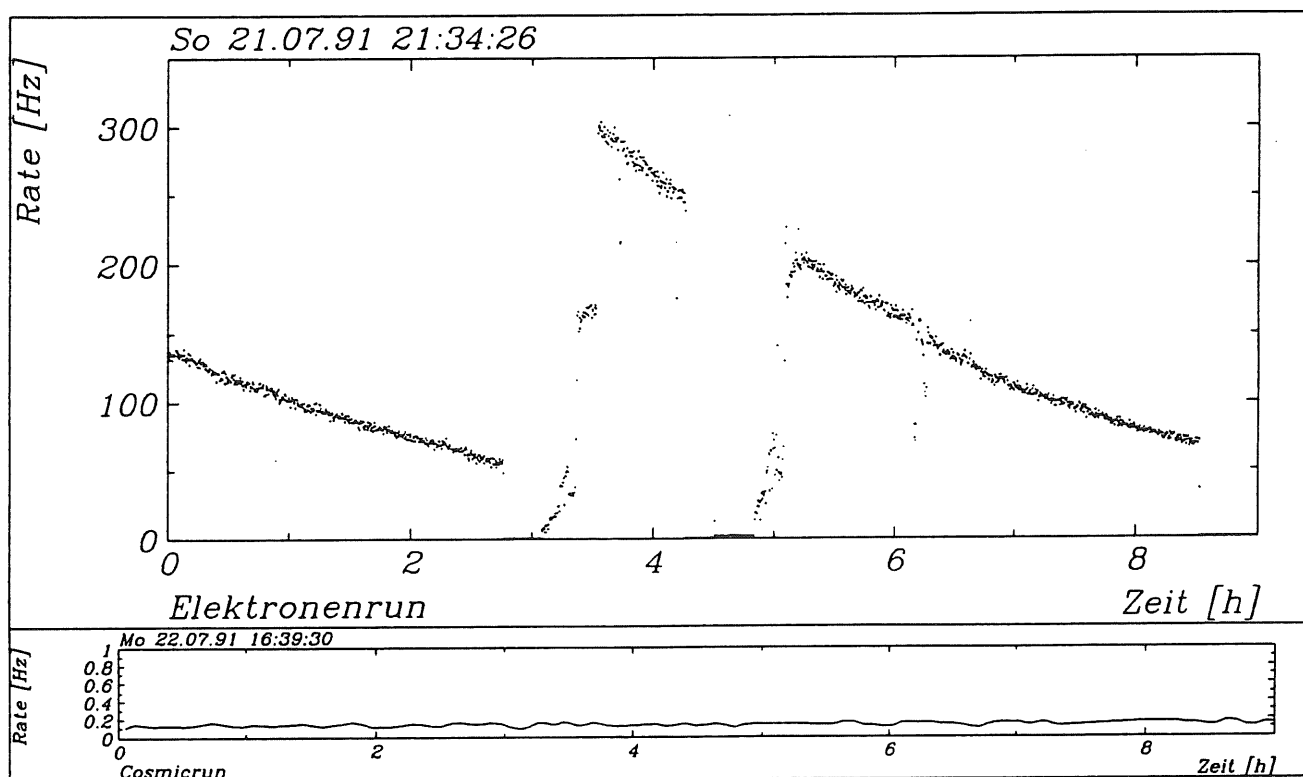


Abbildung 4.2: Vergleich der Tunnelkoinzidenz-Zählraten. Während der Zeitintervalle 0.0h – 2.7h, 3.5h – 4.2h, 5.2h – 8.5h konnten für insgesamt 6.7 Stunden Elektronen weitgehend störungsfrei gespeichert werden. In Abbildung B.1 auf Seite 45 werden lineare und logarithmische Zählratendarstellungen gegenübergestellt.



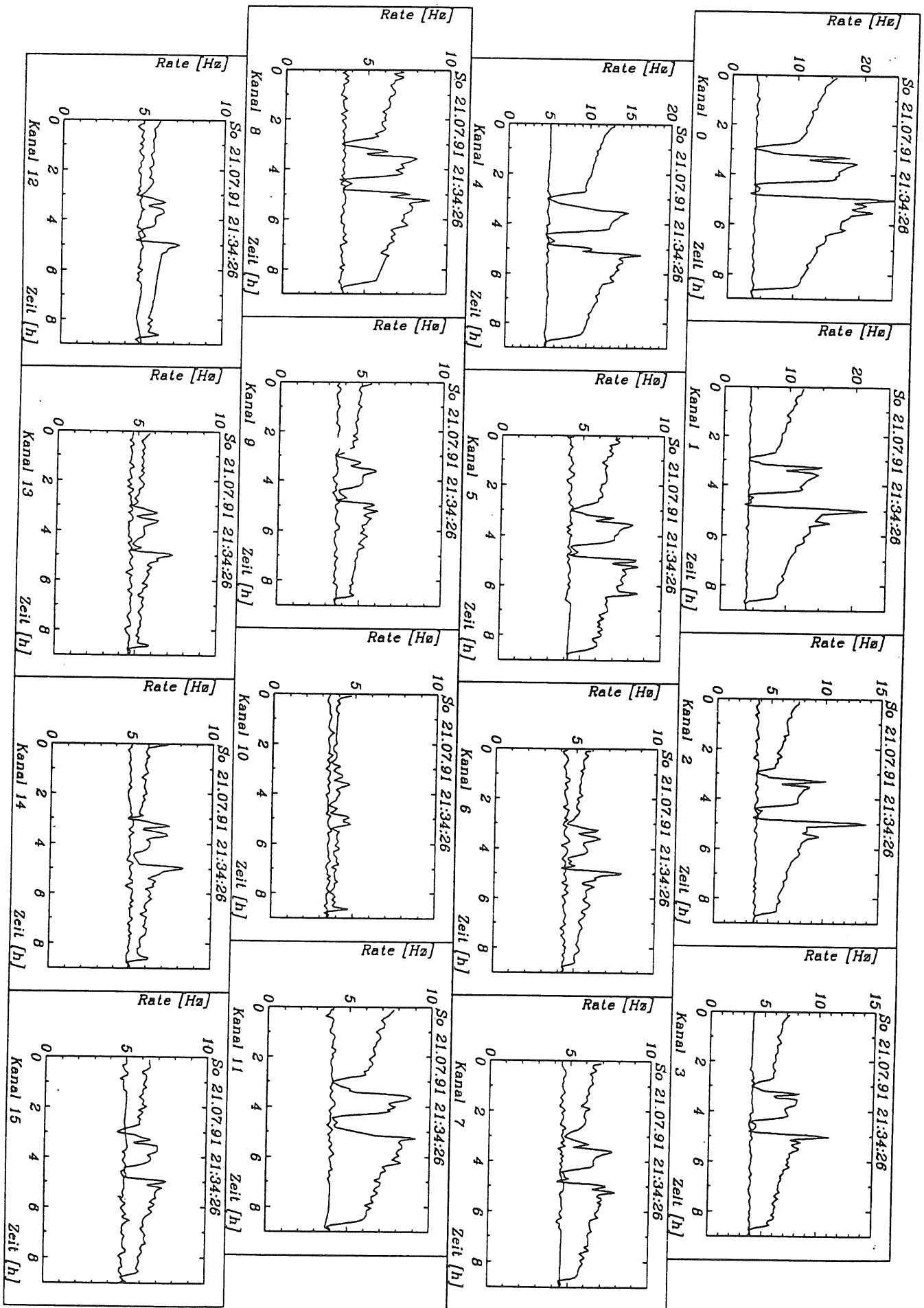


Abbildung 4.3: Zählraten von Kalorimetermodul 2.

An den Zählraten (Abb. 4.3) lassen sich folgende Beobachtungen machen:

- In allen 16 Einzelzählraten spiegelt sich mehr oder weniger ausgeprägt der von der Tunnelkoinzidenz registrierte Zählratenverlauf wider.
- Die Kanäle 0 – 3 zeigen eine deutliche Abhängigkeit der Raten vom Strahlrohrabstand.
- Die Zählraten in der 2.Ebene sind deutlich niedriger (Kanal 4 ist am schlechtesten abgeschirmt).
- Die gegenüber den innenliegenden Kanälen 9 und 10 etwas erhöhten Zählraten der Kanäle 8 und 11 lassen eine Abschirmwirkung gegenüber seitlich eindringender Strahlung erkennen. Dies ist ein Hinweis darauf, daß der vom Kalorimeter gemessene Elektronenstrahl-Untergrund nicht nur parallel zum Strahlrohr gerichtet ist.
- In der 4.Ebene liegen die Zählraten nur noch etwa 1Hz über dem kosmischen Untergrund.

### 4.3 Triggerung

Die Auswahl des richtigen Triggers ist ein zentrales Datennahmeproblem. Ein falscher Trigger, z.B. eine zu hohe Triggerschwelle, unterdrückt u.U. wichtige Ereignisse, die sich später in den ADC-Daten nicht auffinden lassen und zu falschen Interpretationen führen können. Vor der Installation eines Triggers ist deshalb zu klären, was man als Meßergebnis erwartet, was man unterdrücken will und was man nicht messen kann.

Erwartet wurde im Kalorimeter elektromagnetische Schauer zu messen, andererseits aber auch Myonen, die durch Wechselwirkungen der Elektronen in der Materie der HERA-Magnete entstehen können (Die jeweils letzten Quadrupol-Magnete auf Elektronen- und Protonenseite haben einen Abstand von 5.75m zum Wechselwirkungspunkt).

Kriterien für die Triggerauswahl zur Messung des Elektronenstrahluntergrundes:

1. Elektronen mit einer Energie von 26.6GeV bilden in der Betonabschirmung vor dem Kalorimeter elektromagnetische Schauer, deren Maximum man in der ersten Kalorimerebene erwartet (siehe Tabelle 2.1 und 2.2 auf den Seiten 10 und 12). Die Schauerausläufer sollten noch bis in die zweite Ebene hineinreichen. Zur Messung einer Energie von der genannten Größenordnung in einem einzelnen Kanal, müßte das Kalorimeter ohne Verstärker und mit Signalabschwächern ausgelesen werden, um innerhalb des ADC-Meßbereichs zu bleiben.
2. Minimal-ionisierende Myonen deponieren im Kalorimeter eine wesentlich geringere Energie und lassen sich nur mit Verstärkern, zur Triggerung der Diskriminatoren, und möglichst ohne Abschwächer gut auflösen (Abb. 4.3 zeigt die Zählraten mit Verstärkern vor den Diskriminatoren).
3. Während des Elektronen- und des Cosmicruns wurden Zählraten für die Vetowand und das Kalorimeter, ADC-Daten dagegen nur für das Kalorimeter aufgezeichnet. Unter diesen Bedingungen war eine maximale CAMAC-Eventausleserate von 100Hz möglich. Der damit verbundenen Datenrate von 30MByte/Stunde stand eine Festplattenspeicherkapazität von 40MByte gegenüber.
4. Erhöhte Zählraten zeigen sich im wesentlichen in den ersten beiden Kalorimerebenen.
5. Überwachen ließ sich die Betriebsbereitschaft des Kalorimeters im Betrieb mit Verstärkern anhand des kosmischen Untergrundes von 5Hz (Abb. 4.3). Mit Verstärkern entsprechen die Diskriminatorschwellen etwa 0.6EP — d.h. 0.12GeV (Abb. 2.5a auf Seite 15) — ohne dagegen 6EP. Ein eventueller Defekt, z.B. der Ausfall einer Hochspannung, ließ sich einerseits direkt auf dem Bildschirm des PC erkennen, andererseits über die aufgezeichneten Zählraten zeitlich lokalisieren.

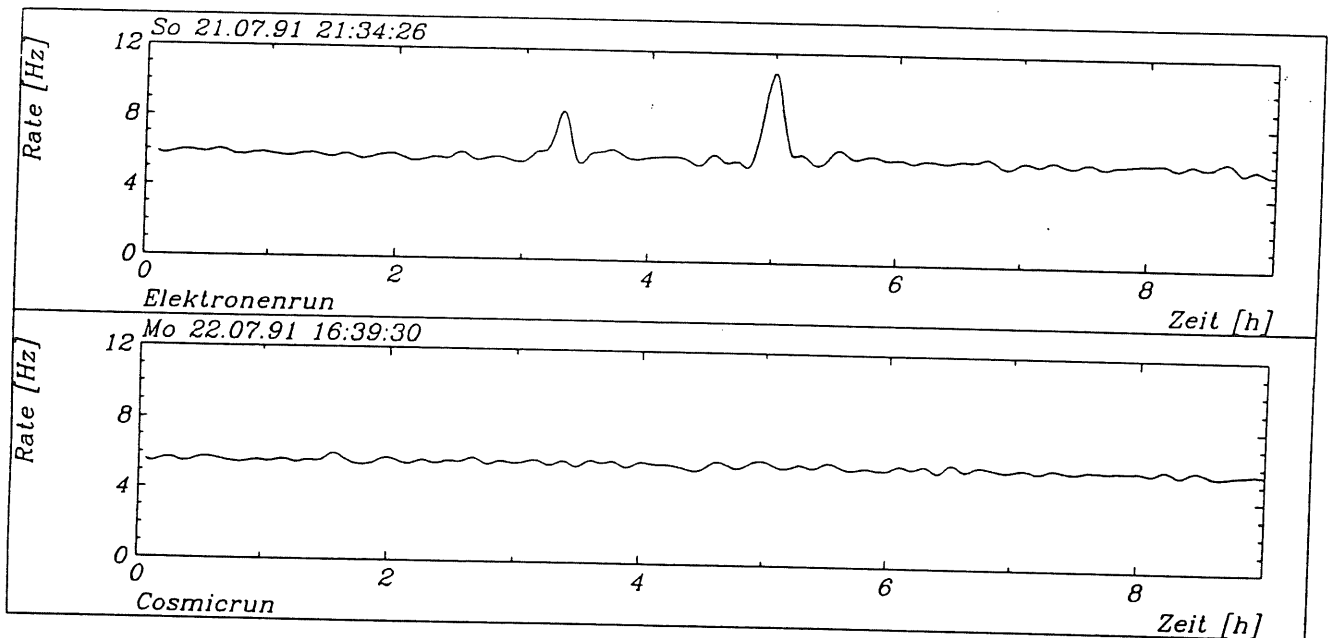


Abbildung 4.4: Triggerraten.

Da der Multiplizitätstrigger noch nicht installiert war und sich der Energieschwellentrigger noch in der Testphase befand, wurde ein Koinzidenztrigger aus erster und zweiter Kalorimerebene gewählt, wodurch eine Mindestreichweite gefordert wurde. Die Verstärker wurden in der Schaltung belassen: Hinter der Betonabschirmung (4 Strahlungslängen) wurde damit für die erste und zweite Kalorimerebene (7 Strahlungslängen pro Ebene) jeweils eine Mindestenergie von  $0.12\text{GeV}$  in einem einzelnen Kanal zur Auslösung eines Koinzidenztriggers gefordert. Die Triggerschaltung war also im wesentlichen auf Myonen abgestimmt, elektromagnetische Schauer sollten aber durch eine erhöhte Overflowrate (Abb. 4.5) in der ersten Kalorimerebene identifizierbar sein. Ein Overflow entspricht  $256\text{pC}$ , also einer Energie von mindestens  $8EP$  bzw.  $1.6\text{GeV}$ .

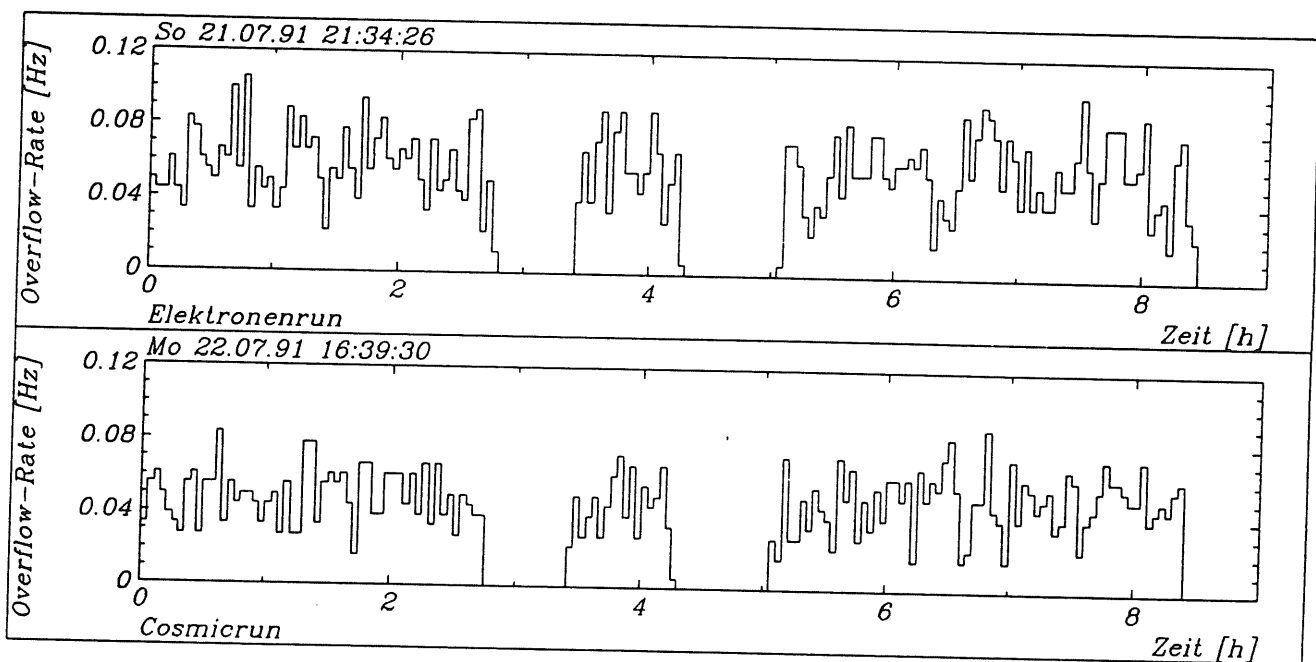


Abbildung 4.5: Overflowraten.

## 4.4 Elektromagnetische Schauer

Ausgewertet wurden die drei Zeitintervalle (Abb. 4.2), in denen der Elektronenstrahl stabil war. Für den Cosmicrun wurden die Intervalle übernommen, um Vergleiche zu vereinfachen. Die während des Elektronenruns gemessene Triggerrate (Abb. 4.4) zeigt zwei Peaks, die zeitlich zwischen den stabilen Strahlphasen liegen und sich als fehlgeschlagene Injektionsversuche deuten lassen. Ansonsten unterscheidet sie sich vom kosmischen Untergrund um maximal 0.5 Hz. Der Vergleich (Abb. 4.5) der Overflow-Raten (Cosmics, die die Koinzidenzbedingung aus spitzem Winkel heraus erfüllen, erzeugen aufgrund des längeren Weges durch die Szintillatorplatten überdurchschnittlich hohe Signale) läßt einen geringen Unterschied erkennen, liefert aber keinen eindeutigen Hinweis auf elektromagnetische Schauer. Mit dem Koinzidenztrigger konnten also keine elektromagnetischen Schauer identifiziert werden.

Anhand der aufgezeichneten Zählraten (Abb. 4.3) läßt sich aber dennoch eine Untergrundrate abschätzen. Die Einzelraten in den Kanälen der ersten und zweiten Kalorimeterebene sind im Gegensatz zur Triggerrate deutlich erhöht. Der Anstieg der Zählraten in der zweiten Ebene kann also nicht von Teilchen hervorgerufen worden sein, die zuvor die erste Ebene durchquert hatten. Dies läßt darauf schließen, daß Untergrundteilchen oder -strahlung, z.B. durch Lücken oder an der Abschirmung vorbei, seitlich in das Kalorimeter hineingestreut wurden und die Kanäle der zweiten und der folgenden Ebenen direkt getroffen haben. Abbildung 4.3 ist eine über die Kanäle 0 – 3 gemittelte Zählrate von etwa 5 Hz pro Kanal (über dem kosmischen Untergrund) zu entnehmen. Geht man davon aus, daß die Raten unkorreliert sind, so ergibt sich aus der Fläche eines Kanals ( $0.15\text{m} \times 0.6\text{m} = 0.09\text{m}^2$ ) eine Rate von  $55\text{Hz}/\text{m}^2$ . Zur Zeit der Messungen wurde ein Elektronenstrom von etwa 2 – 3 mA gespeichert. Durch Hochrechnung auf den späteren Soll-Strom von 60 mA ergibt sich eine durch elektromagnetische Schauer verursachte Untergrundrate von etwa  $1320\text{Hz}/\text{m}^2$ .

## 4.5 Myonen

Der Triggerratenvergleich (Abb. 4.4) ist ein deutlicher Hinweis darauf, daß zum größten Teil Cosmic-Ereignisse aufgezeichnet wurden, so daß ein eventueller Myonen-Untergrund des Elektronenstrahls, d.h. eine erhöhte parallel zum Strahlrohr gerichtete Myonenrate, nur ein schwach ausgeprägter Effekt sein kann. Zur Identifizierung von Myonenspuren im Kalorimeter wurden einige Forderungen — im wesentlichen Schwellenbedingungen — aufgestellt:

1. Alle acht Ebenen wurden durchquert, wobei pro Ebene im „getroffenen“ Kanal eine Mindestenergie von 0.5 EP deponiert wurde (pro Ereignis wurde maximal ein Overflow zugelassen).
2. Die Energiesumme über die drei jeweils verbleibenden drei Kanäle unterschritt eine 0.25 EP-Schwelle.
3. In maximal zwei Ebenen pro Event wurden Doppeltreffer akzeptiert. Der höchste Energieeintrag bestimmte den „getroffenen“ Kanal. Wurden in einem benachbarten Kanal mindestens 0.25 EP deponiert, so sollte die Energiesumme der beiden verbleibenden Kanäle kleiner als 0.25 EP sein.

Die nächste Bedingung ist zur Myonenidentifikation eigentlich nicht mehr erforderlich, erfüllt aber eine Kontrollfunktion, da sie einige spezielle Verkabelungsfehler in der Elektronik aufzudecken erlaubt (z.B. zwei vertauschte Signalkabel einer Kalorimeterebene):

4. Beim Übergang zwischen zwei jeweils gleich orientierten aufeinanderfolgenden Ebenen (z.B. 1. und 3., 3. und 5., 5. und 7. Ebene) änderte sich der Index (Durchnummerierung der Kanäle einer Ebene von eins bis vier) des getroffenen Kanals um maximal |1| und es galt:

$$|\Delta I_{13} + \Delta I_{35} + \Delta I_{57}| = |\Delta I_{13}| + |\Delta I_{35}| + |\Delta I_{57}|$$

zur Spurdefinition innerhalb des Kalorimeters (analog für die Ebenen 2, 4, 6, 8).

### 4.5.1 Darstellung der Myonenspuren

Zur Veranschaulichung der Myonenspuren wurde eine zweidimensionale Darstellung gewählt. In Abbildung 4.6 sind zweimal 16 Felder definiert, die sich als Überlappungsflächen der Kanäle von erster und zweiter bzw. siebter und achter Ebene ergeben. Die durchnummerierten Felder der ersten Ebene bilden

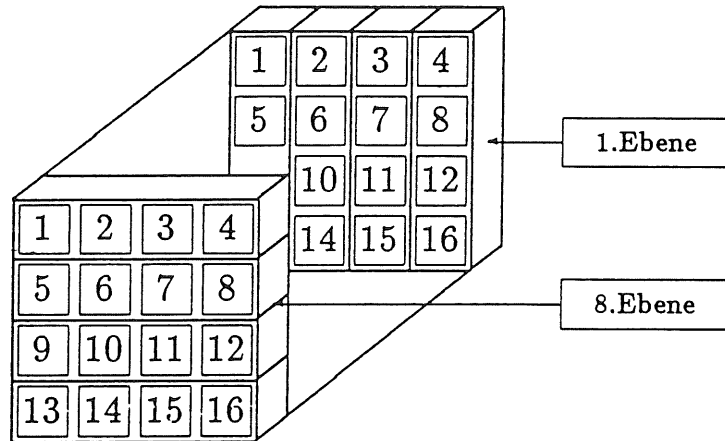


Abbildung 4.6: Einteilung der Kalorimeteerebenen in 16 Bereiche.

die x-Achse, die der zweiten Ebene die y-Achse eines zweidimensionalen Histogramms. Die Häufigkeit verschiedener Kombinationen von Myonen-Eintritts- und -Austrittspunkt werden durch Quadrate veranschaulicht, deren Fläche proportional zur Anzahl der Einträge ist (Abb. 4.7 und 4.8 auf den Seiten 34 und 35; die absoluten Werte sind im Anhang auf Seite 44 angeführt). Für Elektronen- und Cosmicron wurden gleiche Zeitintervalle ausgewertet, um die Darstellungen vergleichbar zu machen.

Drei Gruppen von Quadraten, die von besonderer Bedeutung sind, liegen auf Geraden mit der Steigung „eins“, die die Achsen des Histogramms bei Null (Linie 1), bei  $y = 1$  (Linie 2) und  $x = 1$  (Linie 3) schneiden. Myonen, die das Kalorimeter parallel zum Strahlrohr durchquert haben entsprechen den Einträgen auf Linie 1. Linie 2 repräsentiert Myonen, die das Kalorimeter in spitzem Winkel vom Strahlrohr kommend durchquert haben und Linie 3 diejenigen, die das Kalorimeter in spitzem Winkel in Richtung Strahlrohr durchquert haben. Der Elektronenstrahl zeigt eine deutliche Myonen-Untergrundkomponente parallel zum Strahlrohr und eine etwas schwächere unter kleinem Winkel vom Strahlrohr kommende Komponente.

| $\varphi$   | $\vartheta$ | Entartungsgrad |
|-------------|-------------|----------------|
| $27^\circ$  | $63^\circ$  | 1              |
| $18^\circ$  | $72^\circ$  | 2              |
| $9^\circ$   | $81^\circ$  | 3              |
| $0^\circ$   | $90^\circ$  | 4              |
| $-9^\circ$  | $99^\circ$  | 3              |
| $-18^\circ$ | $108^\circ$ | 2              |
| $-27^\circ$ | $117^\circ$ | 1              |

Tabelle 4.1: Projizierte Winkel.

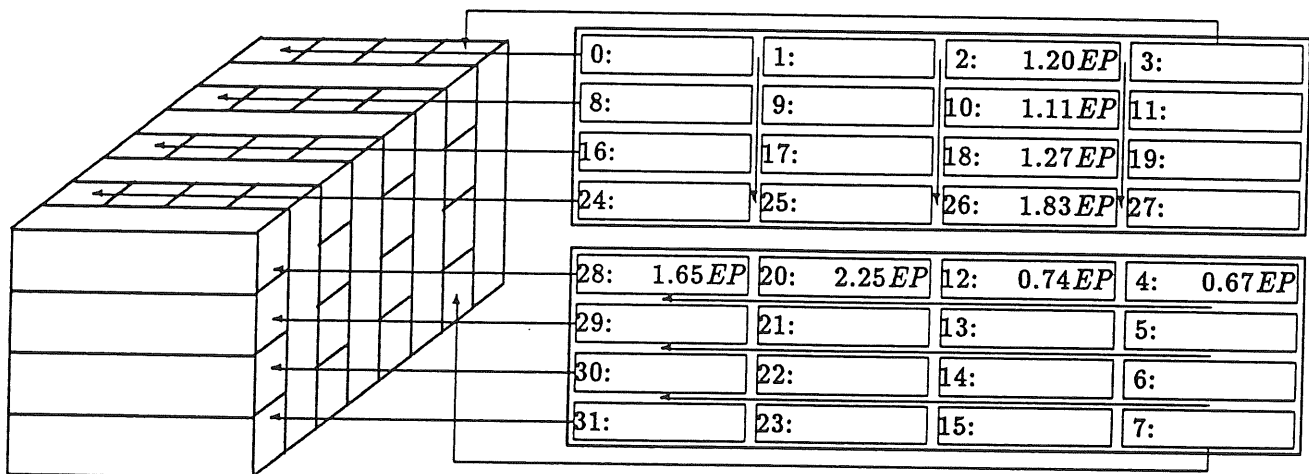
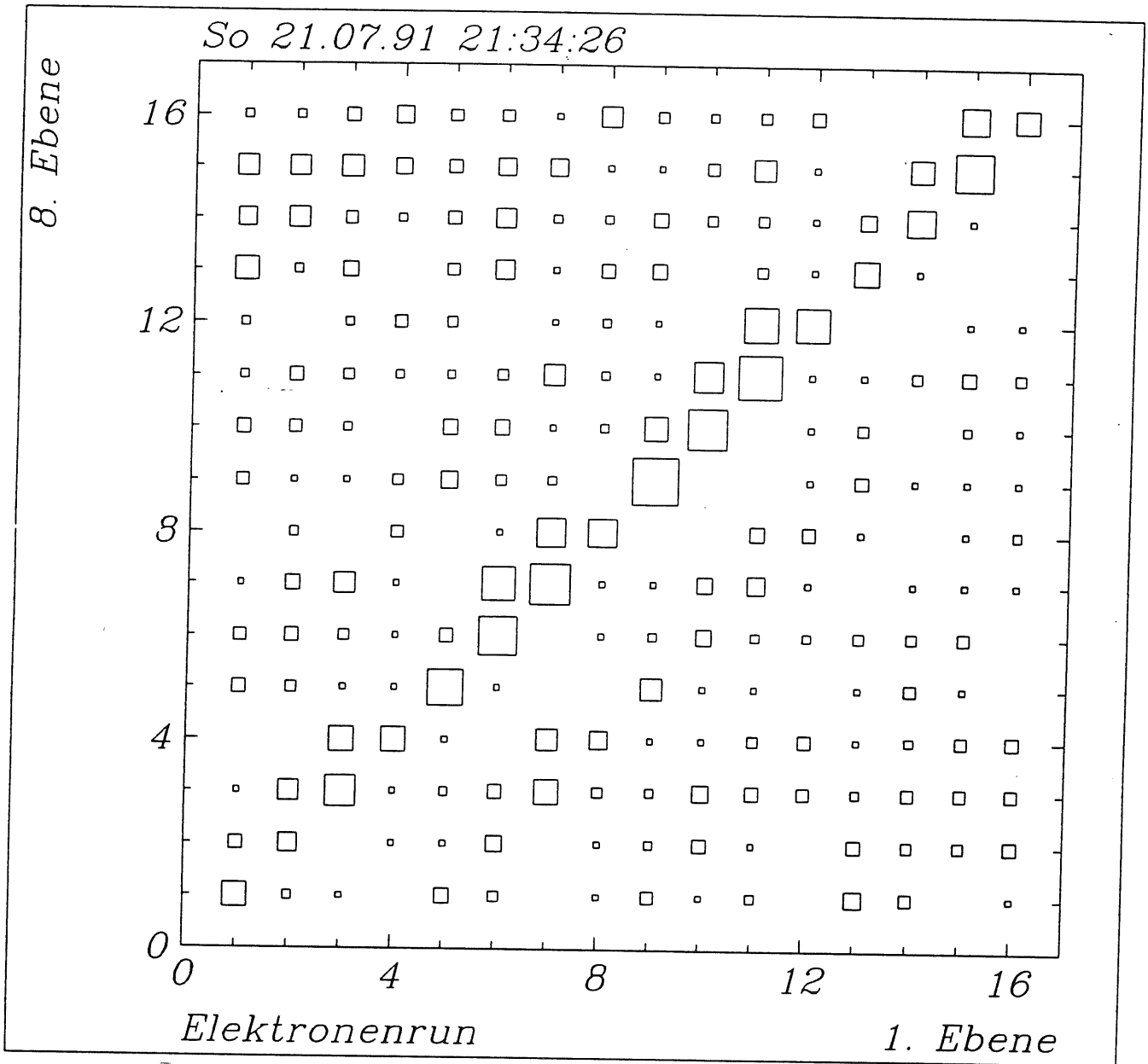


Abbildung 4.7: Elektronenrun: Myonenspuren im Kalorimeter.

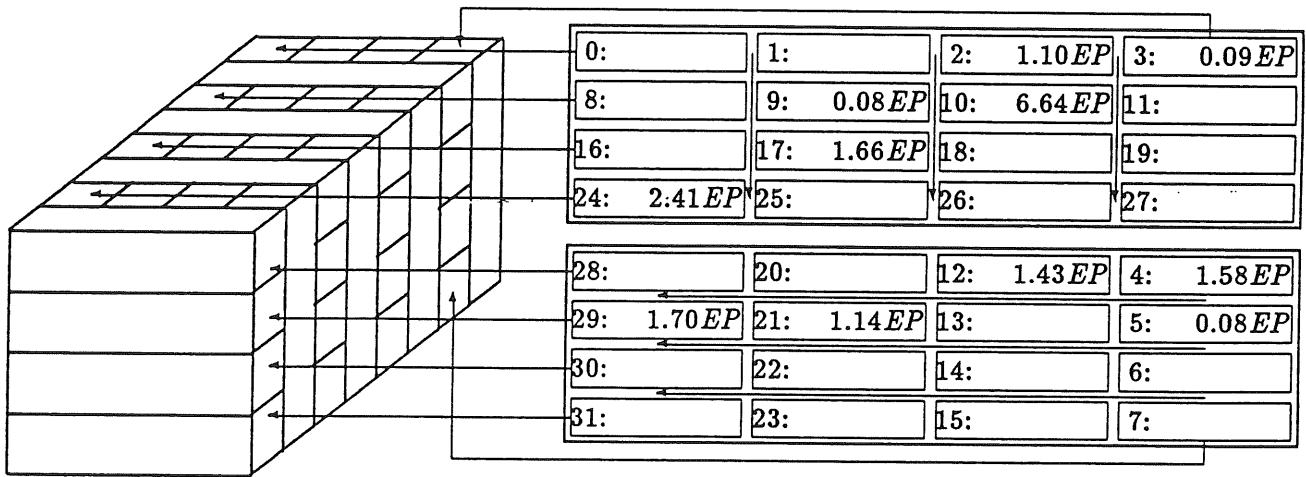
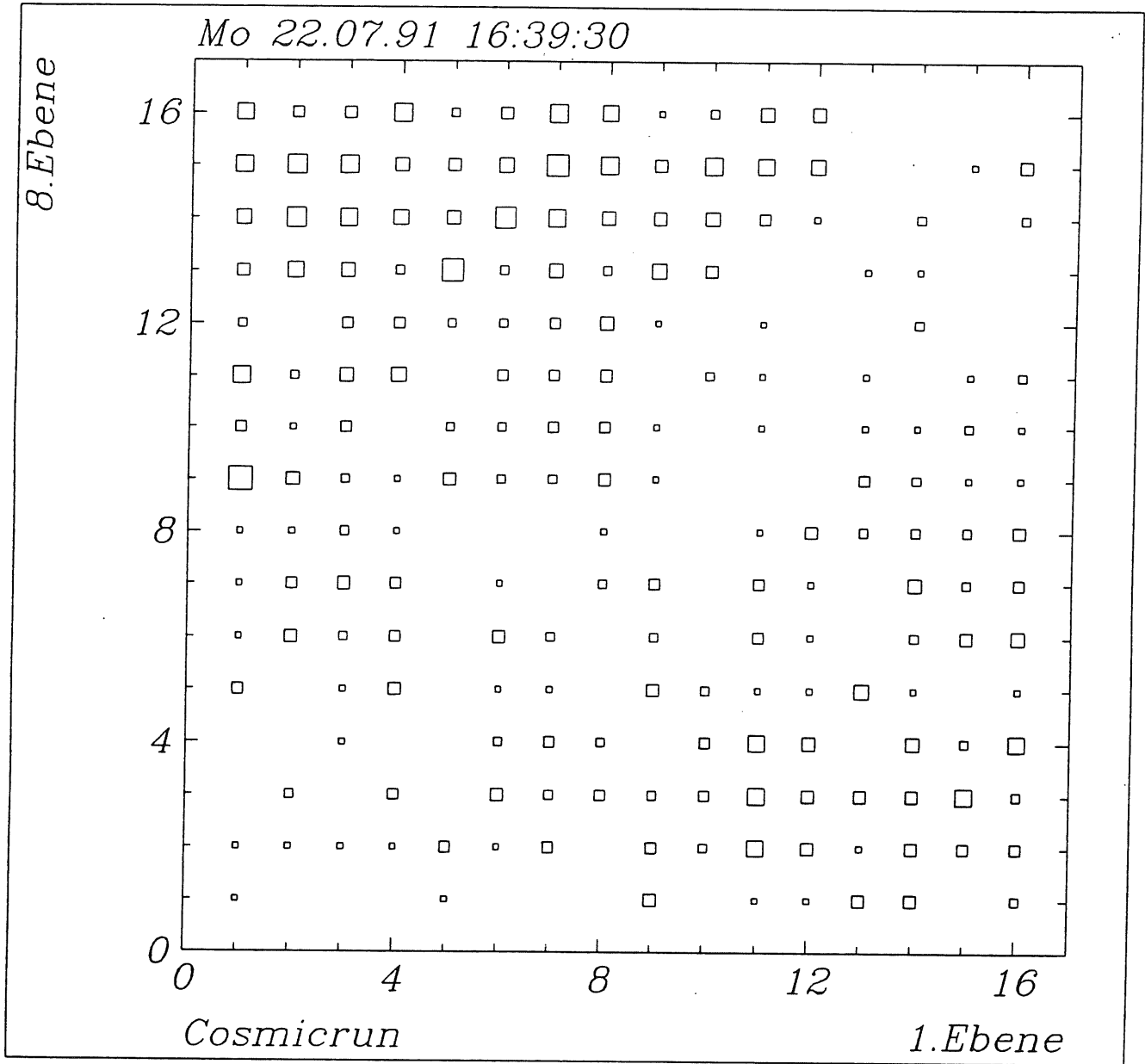


Abbildung 4.8: Cosmicrun: Myonenspuren im Kalorimeter.

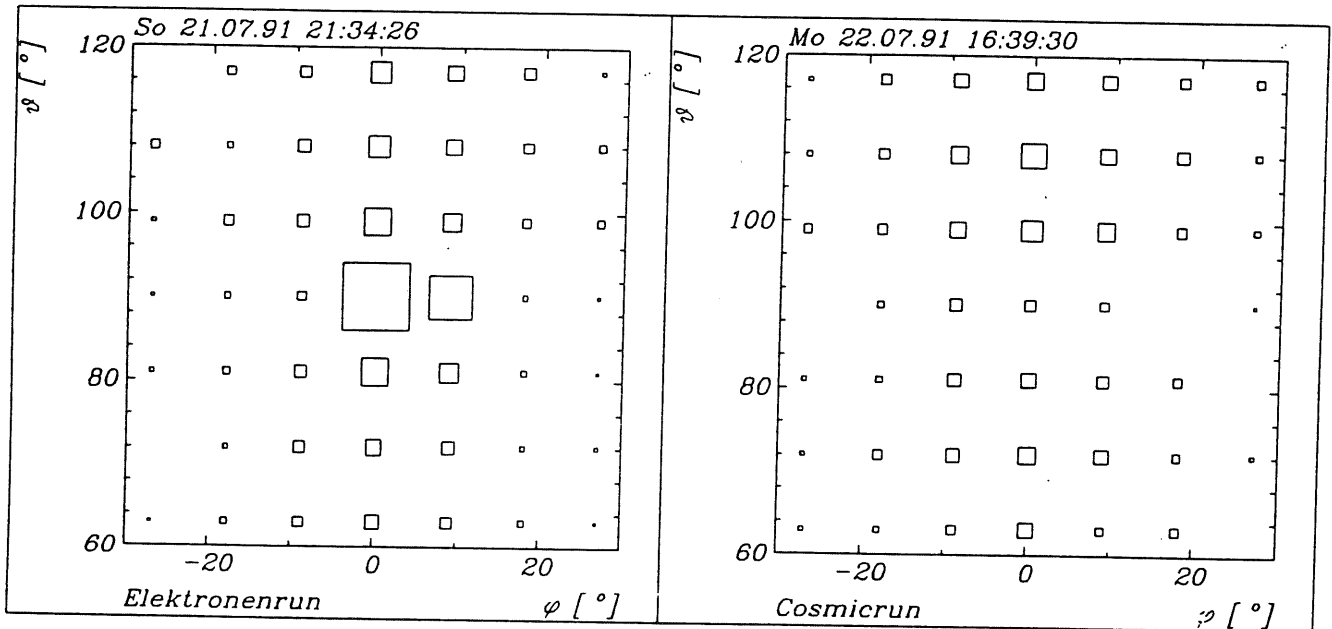


Abbildung 4.9: Winkelverteilung der Myonenspuren.

Unterhalb der Histogramme sind typische Myonenevents abgebildet, um die Energieverteilung im Kalorimeter zu zeigen. Horizontal und vertikal angeordnete Kanäle sind in getrennten Tabellen dargestellt; die Pfeile innerhalb der Tabellen zeigen die Richtung des Elektronenstrahls an.

Die Anordnung der Kalorimeterkanäle bietet eine Darstellung der Myonenspuren als Winkelverteilung an. Durch die vertikal ausgerichteten Kanäle läßt sich ein Winkel  $\varphi$  zur Richtung des Elektronenstrahls definieren, durch die horizontal ausgerichteten Kanäle ein Winkel  $\vartheta$  zu einer senkrechten Achse ( Beide Winkel lassen sich als Projektionen des tatsächlichen Winkels zwischen Myonenspur und Strahlrohr auf zwei Ebenen auffassen, die sich im Strahlrohr rechtwinklig schneiden). Für beide Projektionen lassen sich jeweils sieben verschiedene mittlere Winkel ( $\varphi = 0^\circ$  und  $\vartheta = 90^\circ$  entsprechen der Richtung des Elektronenstrahls.) mit verschiedenen Entartungsgraden definieren (Tabelle 4.1). Abbildung 4.9 zeigt neben der parallel zum Strahlrohr gerichteten Hauptkomponente des Myonenuntergrundes auch die kleinere Komponente, die sich unter einem mittleren Winkel von  $\varphi = 9.5^\circ$  horizontal vom Strahlrohr entfernt (Die absoluten Zahlwerte sind im Anhang auf Seite 43 angegeben).

#### 4.5.2 Untergrundraten der Myonen

In der zeitlichen Darstellung der Untergrundraten (Abb. 4.10) wurden nur Myonen berücksichtigt, die das Kalorimeter horizontal durchquert hatten. Wie schon in Abbildung 4.2 läßt sich eine Abnahme der Untergrundrate erkennen, die die abnehmende Strahlintensität widerspiegelt. Berücksichtigt man, daß im späteren Kollisionsbetrieb ein etwa 24-facher Elektronenstrom gespeichert werden soll und daß das Kalorimeter eine Frontfläche von  $0.36\text{m}^2$  besitzt, so läßt sich bei typischen gemessenen  $0.05\text{Hz}$  eine durch den Elektronenstrahl verursachte Myonenuntergrundrate von  $3.3\text{Hz}/\text{m}^2$  im Bereich des Kalorimeterstandortes erwarten.

#### 4.5.3 Energiespektrum der Myonen

Das Energiespektrum (Abb. 4.11), in dem wiederum nur horizontale Myonen berücksichtigt wurden, ist erwartungsgemäß Landau-verteilt (Abb. 2.9 auf Seite 19). Pro Ebene erwartet man eine Energie von etwa  $1EP$ . Der Peak der Verteilung liegt etwas oberhalb von  $8EP$ , da die Energieeinheit  $EP$  durch die *wahrscheinlichste*, nicht aber durch die etwas größere *mittlere* Pulshöhe definiert wurde.



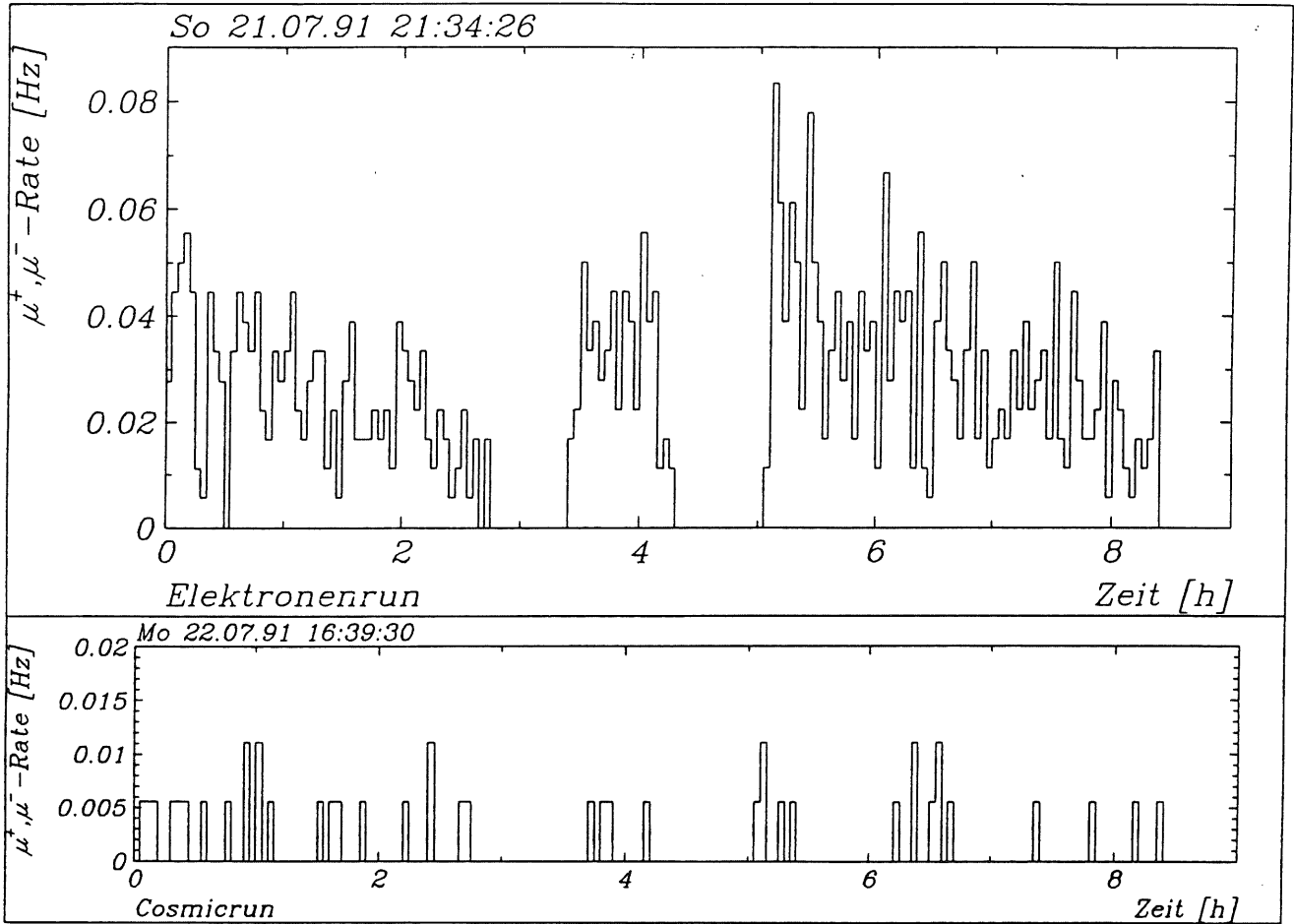


Abbildung 4.10: Untergrundrate horizontaler Myonen.

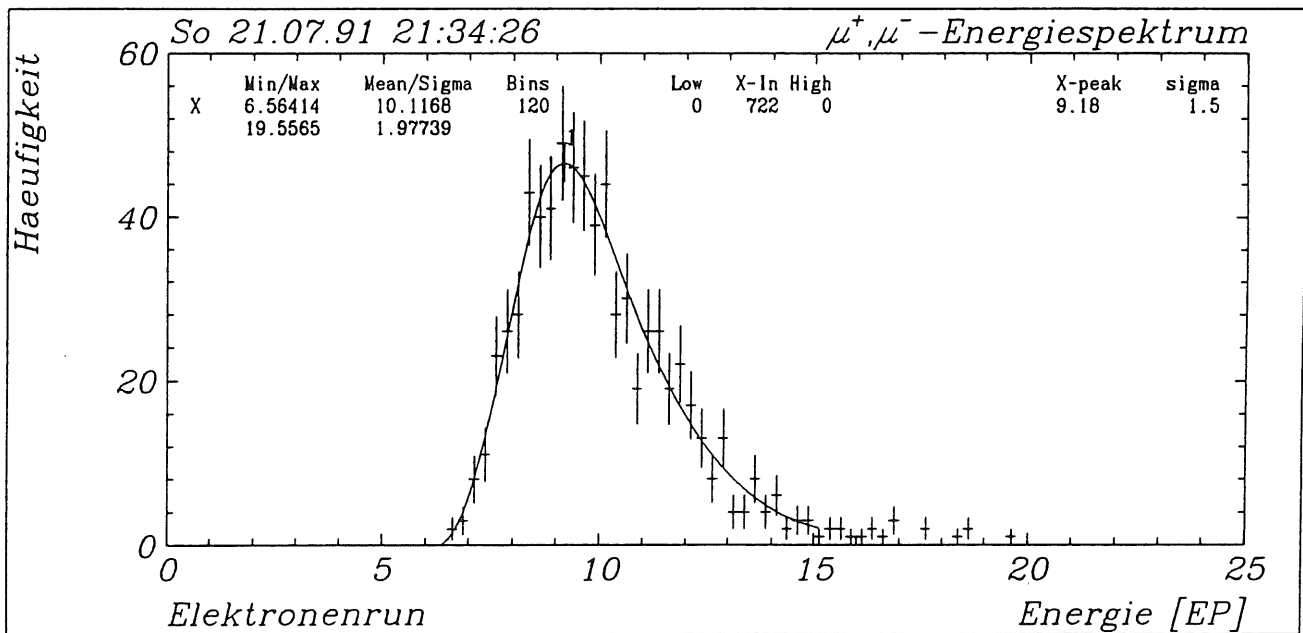


Abbildung 4.11: Energiespektrum horizontaler Myonen.

# Zusammenfassung

Die Testphase des HERA-Speicherringsystems wurde genutzt, um Strahluntergrundstudien durchzuführen und damit Diskussionsgrundlagen über ergänzende Abschirmungsmaßnahmen für den H1-Detektor zu liefern. Zu diesem Zweck wurde ein aus 2.5cm dicken Eisen- und 0.5cm dicken Szintillatorschichten bestehendes segmentiertes hadronisches Sampling-Kalorimeter am Wechselwirkungspunkt des H1-Detektors installiert. Die wesentlichen Elemente dieser Diplomarbeit sind die Kalorimetereichung, dessen Installation und elektronische Verschaltung, die Vorbereitung der Auswerteprogramme und die Analyse des Elektronenstrahl-Untergrundes bei 26.6GeV.

Die relative Eichung der über Photomultiplier ausgelesenen Signalkanäle des Kalorimeters wurde mit kosmischen Myonen durchgeführt, wobei die Vorgabe, die Eichkonstanten innerhalb einer Toleranzgrenze von 25% aneinander anzugleichen, erfüllt und für die meisten Kanäle deutlich unterboten werden konnte.

Die Stabilität der Photomultiplier konnte während der Strahluntergrundmessungen anhand der kosmischen Untergrundrate von etwa 5Hz pro Kanal überwacht werden, da Rauscheffekte praktisch keine Rolle spielten. Nur vereinzelt rauschten einige Kanäle für einige Tage verstärkt, was sich durch deutlich höhere Zählraten oder einen angestiegenen Betriebsstrom bemerkbar machte, „beruhigten“ sich im allgemeinen aber wieder.

Die Strahluntergrundmessungen wurden bei einer Elektronenenergie von 26.6GeV und einem gespeicherten Strom von 2 – 3mA durchgeführt; später sollen Elektronen mit einer Energie von 30GeV und einem Strom von 60mA gespeichert werden. Im Bereich der ersten Ebene des Kalorimeters konnte, hinter einer Synchrotronstrahlungs-Abschirmung von 4Strahlungslängen, eine durch elektromagnetische Schauer verursachte Untergrundrate von etwa 1320Hz/m<sup>2</sup> gemessen und eine mit dem Elektronenstrahl korrelierte Myonenrate von 3.3Hz/m<sup>2</sup> identifiziert werden (jeweils auf den Soll-Strom hochgerechnet).

Anhand des zur Datennahme gewählten Triggers läßt sich abschätzen, daß hinter einer Abschirmung von 11Strahlungslängen pro Untergrundereignis weniger als 0.16GeV deponiert wurden.

Die im Elektronenstrahluntergrund gemessene Myonenkomponente stellt für sich betrachtet ein unerwartetes Ergebnis dar. Aufgrund der niedrigen Rate ist aber keine Störung der Spurenkammern des H1-Detektors zu erwarten.

Anzumerken ist, daß der Elektronenstrahl im Kollisionsbetrieb eine Energie von 30GeV haben wird und durch Strahl-Strahl-Wechselwirkungen mit dem Protonenstrahl aufgebläht werden wird, so daß dann mit höheren Raten zu rechnen ist.

# Anhang A

## Ergänzungen zur Kalorimetereichung

### A.1 Ergebnisse der ADC-Eichung

In den Steigungen der Regressionsgeraden werden leichte Unterschiede zwischen den drei ADC-Modulen<sup>1</sup> erkennbar. Der Defekt in Kanal 26 ließ sich auf ein ständig gesetztes „Bit 4“ zurückführen (Belegung der ADC-Kanäle: Abb. 3.2 auf Seite 26).

| Kanal | Steigung<br>[Counts/pC] | $\sigma$<br>[Counts] | Kanal | Steigung<br>[Counts/pC] | $\sigma$<br>[Counts] | Kanal | Steigung<br>[Counts/pC] | $\sigma$<br>[Counts] |
|-------|-------------------------|----------------------|-------|-------------------------|----------------------|-------|-------------------------|----------------------|
| 0     | 3.894                   | 0.316                | 12    | 3.989                   | 0.416                | 24    | 3.482                   | 0.384                |
| 1     | 3.897                   | 0.316                | 13    | 3.937                   | 0.405                | 25    | 3.504                   | 0.407                |
| 2     | 3.876                   | 0.330                | 14    | 3.970                   | 0.426                | 26    | 3.615                   | 2.154                |
| 3     | 3.893                   | 0.316                | 15    | 3.953                   | 0.405                | 27    | 3.687                   | 0.369                |
| 4     | 3.905                   | 0.344                | 16    | 3.962                   | 0.426                | 28    | 3.483                   | 0.391                |
| 5     | 3.853                   | 0.344                | 17    | 3.951                   | 0.416                | 29    | 3.462                   | 0.450                |
| 6     | 3.871                   | 0.381                | 18    | 3.985                   | 0.405                | 30    | 3.490                   | 0.421                |
| 7     | 3.880                   | 0.302                | 19    | 3.957                   | 0.426                | 31    | 3.496                   | 0.400                |
| 8     | 3.877                   | 0.344                | 20    | 3.958                   | 0.381                | 32    | 3.572                   | 0.334                |
| 9     | 3.904                   | 0.357                | 21    | 3.967                   | 0.426                | 33    | 3.471                   | 0.300                |
| 10    | 3.892                   | 0.316                | 22    | 3.968                   | 0.357                | 34    | 3.497                   | 0.361                |
| 11    | 3.881                   | 0.302                | 23    | 3.986                   | 0.437                | 35    | 3.466                   | 0.397                |

Tabelle A.1: Ergebnisse der ADC-Eichung.

<sup>1</sup>Drei 12 Kanal-ADC vom Typ LRS2249A mit den Inventarnummern: 25/2910, 25/8929, 25/7938.

## A.2 Ortsabhängigkeit der Pulshöhenspektren

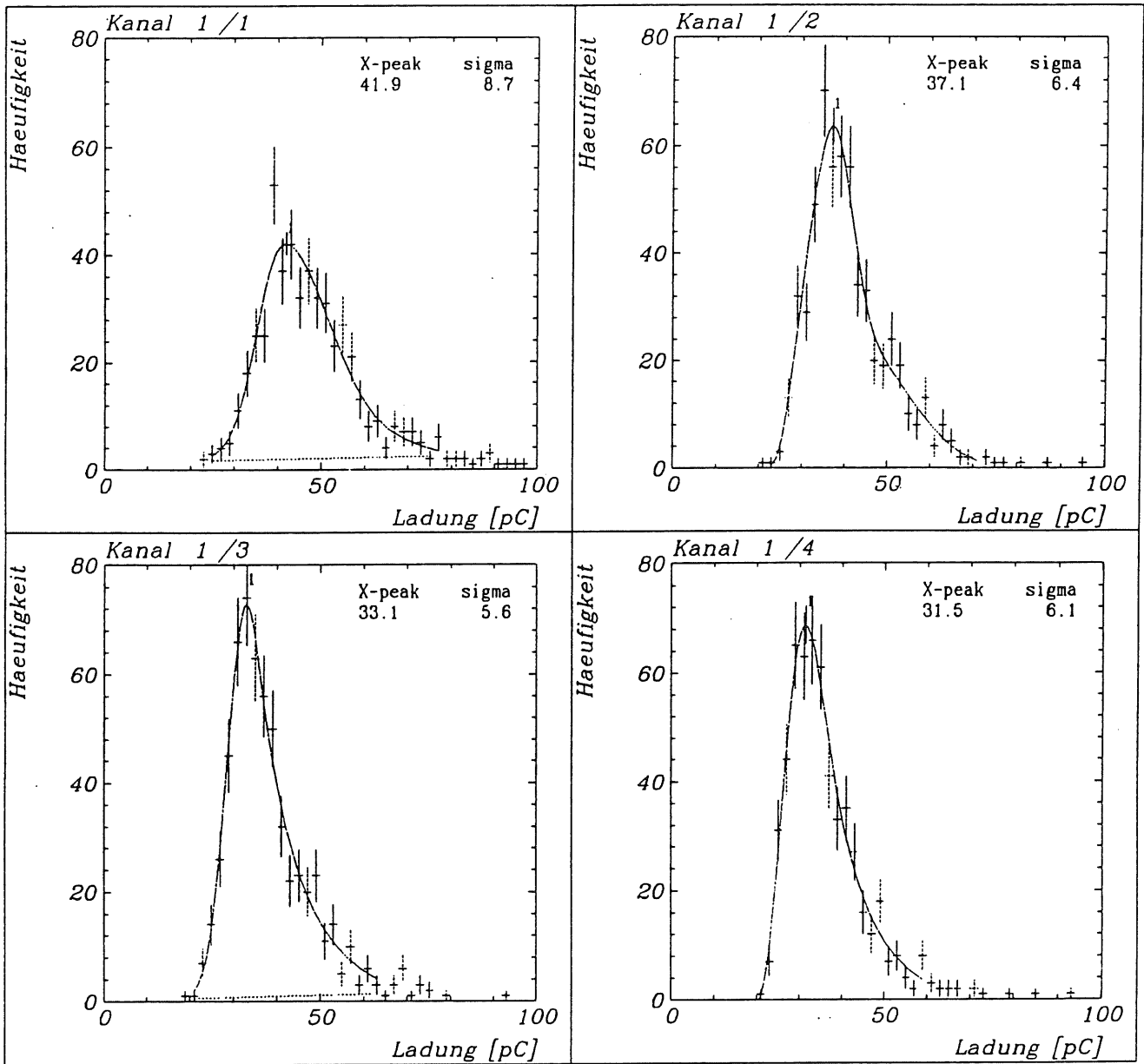


Abbildung A.1: Ortsabhängigkeit der Pulshöhenspektren.

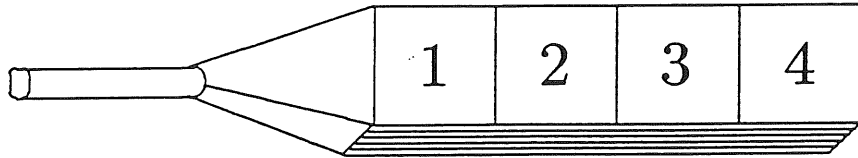


Abbildung A.2: Einteilung eines Zählers in vier Bereiche.

Implizit wurde bei der Bestimmung der Eichkonstanten davon ausgegangen, daß die Pulshöhen unabhängig davon sind, in welchem Abstand von der Photokathode ein Myon die Szintillatorplatten durchquert und daß die Platten homogen durchstrahlt wurden. Die Segmentierung des Kalorimeters bietet an, jeden Kanal in vier Bereiche zu unterteilen. Abbildung A.1 zeigt die Histogramme für die einzelnen Bereiche (vergleiche Abb. 2.9 auf Seite 19). Charakteristisch für alle 32 Kanäle ist:

1. Die Peakpositionen verschieben sich mit zunehmendem Abstand von der Photokathode zu kleineren Energien.
2. Die Spektren von Bereich 1 sind sehr breit, da hier die Weglängenunterschiede des Szintillatortlichtes von der Größenordnung des Abstandes zur Photokathode sind.
3. Die Verteilungen für die Bereiche 2 bis 4 sind sehr schmal.
4. Alle Bereiche haben etwa die gleiche Anzahl von Einträgen.

Es ist zu erwarten, daß sich die Ortsabhängigkeit bei der Energiemessung von Teilchenschauern, die zentral im Kalorimeter entstehen, kaum auswirken wird. Bei Signalen von einzelnen Myonenspuren wird sich die Kalorimeter-Auslesegeometrie dagegen bemerkbar machen.

| Kanal    | Peak 1 [pC]  | Peak 2 [pC]  | Peak 3 [pC]  | Peak 4 [pC]  | Eichkonstante [pC] |
|----------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------------|
| Modul 2: |              |              |              |              |                    |
| 0        | 45.07 ± 0.53 | 36.13 ± 0.48 | 30.55 ± 0.25 | 30.29 ± 0.32 | 32.01 ± 0.22       |
| 1        | 41.94 ± 0.42 | 37.06 ± 0.28 | 33.06 ± 0.25 | 31.47 ± 0.27 | 34.43 ± 0.17       |
| 2        | 40.79 ± 0.41 | 33.67 ± 0.30 | 31.45 ± 0.28 | 30.65 ± 0.26 | 32.88 ± 0.17       |
| 3        | 43.59 ± 0.51 | 38.45 ± 0.38 | 33.33 ± 0.35 | 30.99 ± 0.31 | 34.75 ± 0.23       |
| 4        | 49.98 ± 0.53 | 38.03 ± 0.38 | 33.41 ± 0.31 | 29.89 ± 0.35 | 35.55 ± 0.26       |
| 5        | 42.85 ± 0.38 | 34.30 ± 0.33 | 31.62 ± 0.31 | 29.81 ± 0.24 | 32.99 ± 0.19       |
| 6        | 46.09 ± 0.43 | 37.75 ± 0.30 | 34.28 ± 0.31 | 33.48 ± 0.30 | 35.72 ± 0.20       |
| 7        | 49.03 ± 0.51 | 36.86 ± 0.32 | 30.04 ± 0.29 | 26.66 ± 0.29 | 31.23 ± 0.24       |
| 8        | 49.31 ± 0.55 | 39.18 ± 0.35 | 32.89 ± 0.37 | 30.85 ± 0.34 | 35.06 ± 0.23       |
| 9        | 37.90 ± 0.40 | 32.04 ± 0.29 | 31.19 ± 0.28 | 29.54 ± 0.28 | 31.32 ± 0.17       |
| 10       | 41.17 ± 0.40 | 34.41 ± 0.37 | 32.68 ± 0.30 | 32.63 ± 0.27 | 33.79 ± 0.19       |
| 11       | 50.40 ± 0.56 | 38.27 ± 0.37 | 31.49 ± 0.29 | 28.43 ± 0.28 | 32.43 ± 0.24       |
| 12       | 44.50 ± 0.53 | 38.53 ± 0.35 | 33.69 ± 0.33 | 32.18 ± 0.37 | 35.78 ± 0.22       |
| 13       | 43.08 ± 0.51 | 39.81 ± 0.43 | 34.14 ± 0.36 | 33.04 ± 0.35 | 36.23 ± 0.22       |
| 14       | 48.48 ± 0.51 | 43.06 ± 0.41 | 37.31 ± 0.36 | 34.49 ± 0.42 | 39.59 ± 0.24       |
| 15       | 50.99 ± 0.55 | 41.49 ± 0.46 | 35.26 ± 0.40 | 31.88 ± 0.39 | 36.49 ± 0.29       |
| Modul 4: |              |              |              |              |                    |
| 16       | 40.03 ± 0.45 | 33.09 ± 0.38 | 29.48 ± 0.34 | 26.41 ± 0.29 | 29.67 ± 0.22       |
| 17       | 44.24 ± 0.57 | 38.71 ± 0.35 | 33.30 ± 0.27 | 31.13 ± 0.31 | 33.68 ± 0.21       |
| 18       | 43.11 ± 0.55 | 37.48 ± 0.31 | 32.07 ± 0.33 | 29.60 ± 0.29 | 33.71 ± 0.22       |
| 19       | 43.17 ± 0.41 | 34.78 ± 0.33 | 30.81 ± 0.34 | 29.78 ± 0.32 | 33.52 ± 0.21       |
| 20       | 44.01 ± 0.52 | 37.16 ± 0.41 | 32.09 ± 0.37 | 28.74 ± 0.31 | 33.40 ± 0.28       |
| 21       | 46.02 ± 0.45 | 36.11 ± 0.35 | 30.95 ± 0.32 | 28.53 ± 0.33 | 34.08 ± 0.24       |
| 22       | 50.41 ± 0.54 | 38.16 ± 0.42 | 32.49 ± 0.31 | 30.87 ± 0.32 | 34.40 ± 0.24       |
| 23       | 45.04 ± 0.51 | 35.34 ± 0.38 | 29.82 ± 0.34 | 28.48 ± 0.33 | 32.09 ± 0.24       |
| 24       | 50.78 ± 0.51 | 37.64 ± 0.38 | 31.56 ± 0.33 | 29.26 ± 0.34 | 32.69 ± 0.25       |
| 25       | 42.97 ± 0.49 | 37.17 ± 0.34 | 31.58 ± 0.30 | 30.35 ± 0.29 | 33.25 ± 0.21       |
| 26       | 44.33 ± 0.48 | 35.66 ± 0.28 | 34.03 ± 0.34 | 30.97 ± 0.26 | 33.74 ± 0.21       |
| 27       | 52.98 ± 0.56 | 35.87 ± 0.38 | 33.38 ± 0.33 | 28.91 ± 0.32 | 34.22 ± 0.24       |
| 28       | 44.50 ± 0.46 | 37.48 ± 0.36 | 34.06 ± 0.39 | 31.19 ± 0.32 | 35.14 ± 0.24       |
| 29       | 48.64 ± 0.46 | 37.60 ± 0.42 | 32.68 ± 0.31 | 28.60 ± 0.36 | 33.41 ± 0.25       |
| 30       | 44.09 ± 0.58 | 38.33 ± 0.42 | 31.76 ± 0.38 | 28.13 ± 0.38 | 33.86 ± 0.26       |
| 31       | 48.68 ± 0.55 | 39.22 ± 0.44 | 36.01 ± 0.37 | 31.02 ± 0.37 | 35.71 ± 0.27       |

Tabelle A.2: Ortsabhängigkeit der Pulshöhenspektren. Zum Vergleich mit den Peaks der Bereiche 1 bis 4 sind die Eichkonstanten erneut aufgelistet.

## Anhang B

# Ergänzungen zur Auswertung des Elektronenruns

### B.1 Winkelverteilung der Myonenspuren

Um Zugriff auf die absoluten Häufigkeiten zu haben, sind die Winkelverteilungen (s. Abbildung 4.9 auf Seite 36) alternativ zu den zweidimensionalen Histogrammen in Tabellenform dargestellt.

|      |   |    |    |     |     |    |   |
|------|---|----|----|-----|-----|----|---|
| 117° | 0 | 8  | 13 | 48  | 25  | 14 | 2 |
| 108° | 8 | 4  | 18 | 51  | 27  | 11 | 6 |
| 99°  | 2 | 10 | 17 | 81  | 33  | 8  | 6 |
| 90°  | 1 | 4  | 8  | 496 | 209 | 3  | 1 |
| 81°  | 2 | 6  | 16 | 84  | 41  | 4  | 1 |
| 72°  | 0 | 3  | 15 | 26  | 18  | 3  | 2 |
| 63°  | 1 | 5  | 11 | 20  | 13  | 4  | 1 |

|      |      |      |     |    |    |     |     |
|------|------|------|-----|----|----|-----|-----|
| 117° | 2    | 11   | 20  | 32 | 20 | 11  | 7   |
| 108° | 3    | 12   | 33  | 69 | 28 | 16  | 4   |
| 99°  | 8    | 10   | 27  | 49 | 32 | 10  | 4   |
| 90°  | 0    | 4    | 15  | 13 | 9  | 0   | 1   |
| 81°  | 2    | 4    | 18  | 22 | 14 | 8   | 0   |
| 72°  | 2    | 10   | 19  | 33 | 20 | 7   | 2   |
| 63°  | 2    | 3    | 9   | 23 | 7  | 9   | 0   |
|      | -27° | -18° | -9° | 0° | 9° | 18° | 27° |

Tabelle B.1: Winkelverteilung in Tabellenform.

## B.2 Myonenspuren

Die angegebenen Tabellen entsprechen den Abbildungen 4.7 und 4.8 auf den Seiten 34 und 35.

|                |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |
|----------------|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|
| 8.             | 2  | 2  | 5  | 8  | 4  | 4  | 1  | 12 | 3  | 2  | 2  | 5  | 0  | 0  | 21 | 16 |
| <i>E</i>       | 12 | 11 | 13 | 7  | 5  | 9  | 9  | 1  | 1  | 4  | 13 | 1  | 0  | 15 | 40 | 0  |
| <i>b</i>       | 9  | 12 | 4  | 2  | 5  | 11 | 2  | 2  | 6  | 3  | 3  | 1  | 7  | 21 | 1  | 0  |
| <i>e</i>       | 15 | 2  | 6  | 0  | 4  | 10 | 1  | 5  | 6  | 0  | 3  | 1  | 17 | 1  | 0  | 0  |
| <i>n</i>       | 2  | 0  | 2  | 4  | 3  | 0  | 1  | 2  | 1  | 0  | 33 | 31 | 0  | 0  | 1  | 1  |
| <i>e</i>       | 2  | 5  | 3  | 2  | 2  | 3  | 12 | 2  | 1  | 25 | 53 | 1  | 1  | 3  | 5  | 3  |
|                | 5  | 4  | 2  | 0  | 6  | 6  | 1  | 2  | 15 | 44 | 0  | 1  | 3  | 0  | 2  | 1  |
|                | 4  | 1  | 1  | 3  | 8  | 3  | 2  | 0  | 61 | 0  | 0  | 1  | 5  | 1  | 1  | 1  |
|                | 0  | 2  | 0  | 4  | 0  | 1  | 24 | 23 | 0  | 0  | 6  | 5  | 1  | 0  | 1  | 2  |
|                | 1  | 6  | 12 | 1  | 0  | 31 | 46 | 1  | 1  | 7  | 9  | 1  | 0  | 1  | 1  | 1  |
|                | 4  | 5  | 3  | 1  | 5  | 41 | 0  | 1  | 2  | 7  | 2  | 2  | 3  | 3  | 4  | 0  |
|                | 5  | 3  | 1  | 1  | 35 | 1  | 0  | 0  | 13 | 1  | 1  | 0  | 1  | 4  | 1  | 0  |
|                | 0  | 0  | 17 | 17 | 1  | 0  | 13 | 9  | 1  | 1  | 3  | 5  | 1  | 2  | 4  | 5  |
|                | 1  | 11 | 26 | 1  | 2  | 5  | 17 | 3  | 2  | 8  | 5  | 4  | 2  | 4  | 4  | 4  |
|                | 5  | 9  | 0  | 1  | 1  | 7  | 0  | 1  | 2  | 5  | 1  | 0  | 5  | 3  | 3  | 5  |
|                | 16 | 2  | 1  | 0  | 6  | 3  | 0  | 1  | 4  | 1  | 2  | 0  | 8  | 4  | 0  | 1  |
| <i>1.Ebene</i> |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |

Tabelle B.2: Elektronenrun: Myonenspuren im Kalorimeter.

|                |    |    |   |   |    |    |    |   |   |   |   |   |   |   |   |   |
|----------------|----|----|---|---|----|----|----|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 8.             | 7  | 3  | 4 | 9 | 2  | 4  | 9  | 7 | 1 | 2 | 5 | 5 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| <i>E</i>       | 8  | 10 | 9 | 5 | 4  | 6  | 13 | 9 | 4 | 9 | 7 | 6 | 0 | 0 | 1 | 4 |
| <i>b</i>       | 6  | 10 | 8 | 6 | 5  | 12 | 8  | 5 | 4 | 5 | 3 | 1 | 0 | 2 | 0 | 2 |
| <i>e</i>       | 4  | 7  | 5 | 2 | 13 | 2  | 5  | 2 | 6 | 4 | 0 | 0 | 1 | 1 | 0 | 0 |
| <i>n</i>       | 2  | 0  | 3 | 3 | 2  | 2  | 3  | 5 | 1 | 0 | 1 | 0 | 0 | 2 | 0 | 0 |
| <i>e</i>       | 8  | 2  | 5 | 6 | 0  | 3  | 3  | 4 | 0 | 2 | 1 | 0 | 1 | 0 | 1 | 2 |
|                | 3  | 1  | 3 | 0 | 2  | 2  | 3  | 3 | 1 | 0 | 1 | 0 | 1 | 1 | 2 | 1 |
|                | 15 | 5  | 2 | 1 | 4  | 2  | 2  | 4 | 1 | 0 | 0 | 0 | 3 | 2 | 1 | 1 |
|                | 1  | 1  | 2 | 1 | 0  | 0  | 0  | 1 | 0 | 0 | 1 | 4 | 2 | 2 | 2 | 4 |
|                | 1  | 3  | 4 | 3 | 0  | 1  | 0  | 2 | 3 | 0 | 3 | 1 | 0 | 5 | 2 | 3 |
|                | 1  | 4  | 2 | 3 | 0  | 4  | 2  | 0 | 2 | 0 | 3 | 1 | 0 | 2 | 4 | 5 |
|                | 3  | 0  | 1 | 4 | 0  | 1  | 1  | 0 | 4 | 2 | 1 | 1 | 6 | 1 | 0 | 1 |
|                | 0  | 0  | 1 | 0 | 0  | 2  | 3  | 2 | 0 | 3 | 7 | 5 | 0 | 5 | 2 | 7 |
|                | 0  | 2  | 0 | 3 | 0  | 4  | 2  | 3 | 2 | 3 | 8 | 4 | 4 | 4 | 8 | 2 |
|                | 1  | 1  | 1 | 1 | 3  | 1  | 3  | 0 | 3 | 2 | 7 | 4 | 1 | 4 | 3 | 3 |
|                | 1  | 0  | 0 | 0 | 1  | 0  | 0  | 0 | 4 | 0 | 1 | 1 | 4 | 4 | 0 | 2 |
| <i>1.Ebene</i> |    |    |   |   |    |    |    |   |   |   |   |   |   |   |   |   |

Tabelle B.3: Cosmicrun: Myonenspuren im Kalorimeter.



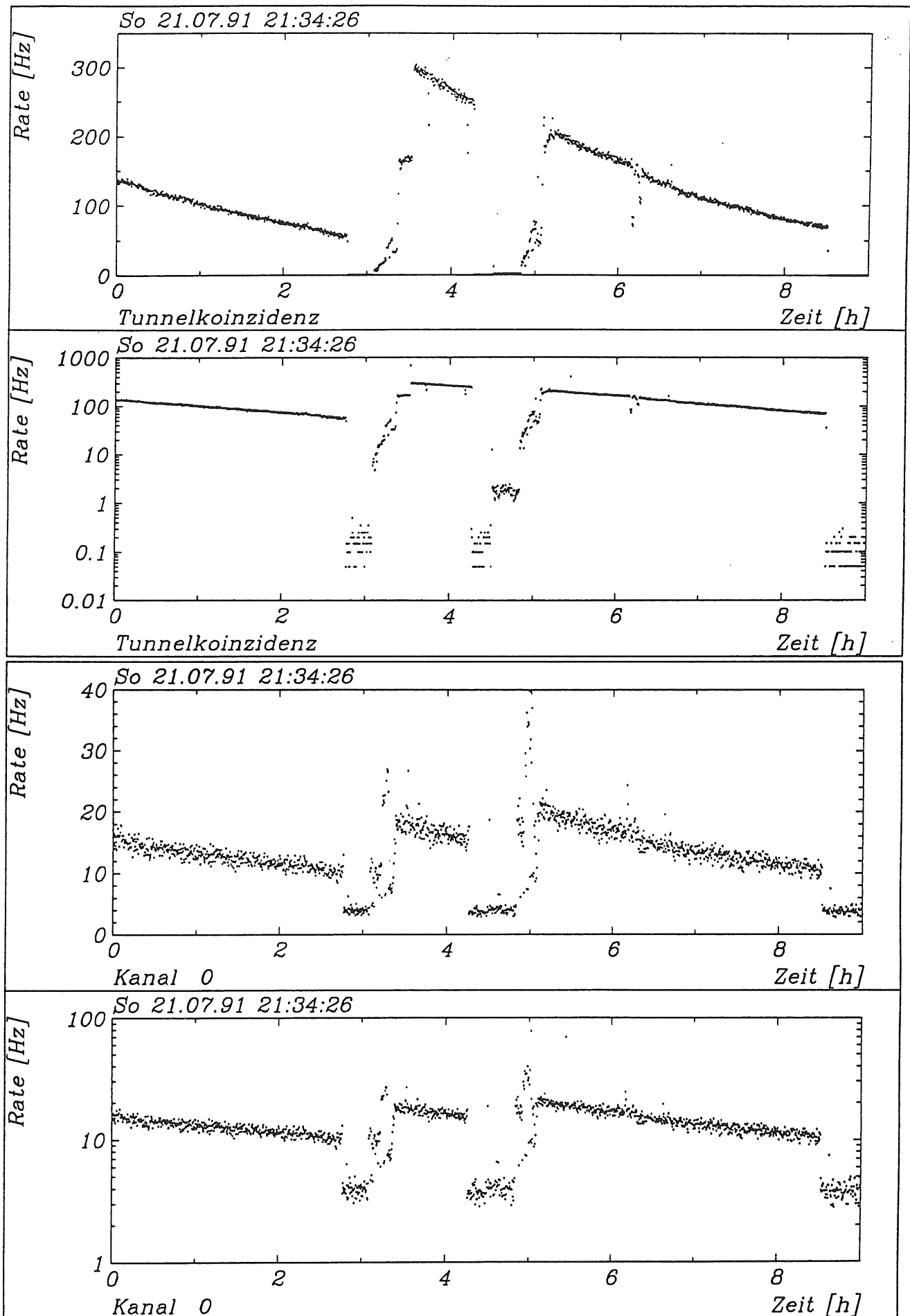


Abbildung B.1: Gegenüberstellung von linearer und logarithmischer Zählratendarstellung.

# Literaturverzeichnis

- [ABR81] H. Abramowicz et al. • *The Response and Resolution of an Iron-Scintillator Calorimeter for Hadronic and Electromagnetic Showers between 10GeV and 140GeV* • Nuclear Instruments and Methods 180(1981)429–439
- [BLO91] V. Blobel • *LOOK — A System for Data Analysis* • Ein Softwarepaket am DESY, das zur Zeit von S. Levonian betreut wird
- [BLÜ81] H. Blümer et al. • *Results from the 1981 Test Calorimeter Run* • European Organization for Nuclear Research, 1982
- [BLÜ82] H. Blümer • *Messungen zur Kalorimetrie von Elektronen und Hadronen* • Diplomarbeit an der Universität Dortmund 1982
- [BRI87] R. Brinkmann • *Simulation of Background from Proton Losses in the HERA Straight Sections* • interner Bericht: DESY HERA 87-19
- [CDHS86] E. Hughes • *Measurement of Hadronic and Electromagnetic Shower Development between 10GeV and 140GeV by an Iron-Scintillator Calorimeter* • CDHS Internal Report, CERN 1986
- [FLA92] K. Flamm • Diplomarbeit in Vorbereitung
- [FLG77a] W. Flauger et al. • *Tests of the Stac Target using Electrons with Energies between 0.5 and 6.5GeV and Cosmic Rays* • interner Bericht CERN 1977
- [FLG77b] W. Flauger et al. • *Calibration Tests of the Heavy Target Stac* • interner Bericht CERN 1977
- [HER86] H1-Collaboration • *Technical Proposal for the H1-Detector* • DESY 1986
- [HER89] H1 • HERA-Bulletin Nr. 16, 1989
- [HER90] *Schwerpunkt HERA* • DESY-Journal 3, 1990
- [KLE87] K. Kleinknecht • *Detektoren für Teilchenstrahlung* • Teubner 1987
- [KNE92] U. Knecht • Diplomarbeit in Vorbereitung
- [LEO87] W.R. Leo • *Techniques for Nuclear and Particle Physics Experiments* • Springer-Verlag 1987

- [LEV91] Chr. Leverenz • *Aufbau und Test eines Szintillationszählersystems zur Bestimmung des Strahluntergrundes am H1-Experiment sowie erste Strahlstudien* • Diplomarbeit am DESY 1991
- [LOH86] E. Lohrmann • *Hochenergiephysik* • Teubner 1986
- [PDB90] Particle Data Group • *Particle Properties Data Booklet* • Ausgabe 1990
- [PER87] D.H. Perkins • *Introduction to High Energy Physics* • Addison-Wesley 1987
- [R&W80] J. Rothberg and J. Wotschack • *Results from the Test Calorimeter* • interner Bericht CERN 1980
- [SCH90] P. Schmüser • *Zur Fertigstellung von HERA* • Physikalische Blätter 46 (1990) Nr. 12
- [VKS91] K. Flamm, U. Knecht, V. Korbel, Chr. Leverenz, A. Schwind, G.G. Winter • *Persöhnliche Mitteilungen im Rahmen der Vetowand-Kalorimeter-Subkollaboration bei DESY*
- [WEG89] D. Wegener • *Hadronkalorimeter — Entwicklung und Anwendungen* • Physikalische Blätter 45 (1989) Nr. 9

# Abbildungsverzeichnis

|      |   |    |
|------|---|----|
| 1.1  | HERA-Speicherringe und Vorbeschleuniger . . . . .                           | 2  |
| 1.2  | Schematische Darstellung des H1-Detektors . . . . .                         | 5  |
| 1.3  | Mittlere Reichweite und mittlerer Energieverlust nach Bethe-Bloch . . . . . | 6  |
| 2.1  | Energieverlust durch Ionisation . . . . .                                   | 9  |
| 2.2  | Elektromagnetische Schauer . . . . .  | 11 |
| 2.3  | Detaillierte Struktur eines Kalorimetermoduls . . . . .                     | 12 |
| 2.4  | Proportionalität zwischen sichtbarer Energie und Primärenergie . . . . .    | 14 |
| 2.5  | Energie-Response und Auflösung . . . . .                                    | 15 |
| 2.6  | Responseverhältnis von Pionen zu Elektronen . . . . .                       | 16 |
| 2.7  | Signalzeugung und elektronische Verarbeitung . . . . .                      | 18 |
| 2.8  | Triggerschaltbild . . . . .   | 18 |
| 2.9  | Pulshöhenspektrum minimalionisierender Myonen . . . . .                     | 19 |
| 3.1  | Meßaufbau in Halle Nord . . . . .   | 23 |
| 3.2  | Triggerlogik . . . . .  | 24 |
| 4.1  | Ergebnisse der Dosimeterauswertung . . . . .                                | 27 |
| 4.2  | Tunnelkoinzidenz-Zählraten . . . . .  | 28 |
| 4.3  | Zählraten von Modul 2 . . . . .   | 29 |
| 4.4  | Triggerraten . . . . .  | 31 |
| 4.5  | Overflowraten . . . . .   | 31 |
| 4.6  | Einteilung der Kalorimerebenen in 16 Bereiche . . . . .                     | 33 |
| 4.7  | Elektronenrun: Myonenspuren . . . . .                                       | 34 |
| 4.8  | Cosmicrun: Myonenspuren . . . . .   | 35 |
| 4.9  | Winkelverteilung der Myonenspuren . . . . .                                 | 36 |
| 4.10 | Untergrundraten horizontaler Myonen . . . . .                               | 37 |
| 4.11 | Energiespektrum horizontaler Myonen . . . . .                               | 37 |
| A.1  | Ortsabhängigkeit der Pulshöhenspektren . . . . .                            | 40 |
| A.2  | Einteilung eines Zählers in vier Bereiche . . . . .                         | 41 |
| B.1  | Vergleich der Zählratendarstellungen . . . . .                              | 45 |

# Tabellenverzeichnis

|     |   |    |
|-----|---|----|
| 1.1 | Ringparameter von HERA . . . . .                              | 3  |
| 2.1 | Atomare und nukleare Materialeigenschaften . . . . .          | 10 |
| 2.2 | Elektromagnetische und hadronische Schauer in Eisen . . . . . | 12 |
| 2.3 | Eichtabelle . . . . .   | 21 |
| 3.1 | Geräteliste . . . . .   | 25 |
| 3.2 | Belegung der ADC-Eingänge und der Zähler . . . . .            | 26 |
| 4.1 | Projizierte Winkel . . . . .                                  | 33 |
| A.1 | ADC-Eichung . . . . .   | 39 |
| A.2 | Ortsabhängigkeit der Pulshöhenspektren . . . . .              | 42 |
| B.1 | Winkelverteilung in Tabellenform . . . . .                    | 43 |
| B.2 | Elektronenrun: Myonenspuren . . . . .                         | 44 |
| B.3 | Cosmicrun: Myonenspuren . . . . .                             | 44 |

# Danksagung und Erklärung laut Prüfungsordnung

Zum Abschluß meiner Diplomarbeit möchte ich mich herzlich bei meiner Frau *Αλεξαντρα* bedanken, die mich während meines ganzen Studiums unermüdlich unterstützt und immer zu mir gehalten hat. Feststellen möchte ich, daß mir die Zeit am DESY viel Spaß gemacht hat und ich eine Menge sowohl im fachlichen, als auch im menschlichen Bereich dazugelernt habe. Einen großen Anteil daran hat mit Sicherheit Christian Leverenz, dem ich für die freundschaftliche und einmalig gute Zusammenarbeit danken möchte.

Bedanken möchte ich mich auch bei Herrn Prof. Dr. H. Spitzer für die Beurteilung dieser Arbeit und die Anregungen zur Auswertung, Frau Prof. Dr. B. Naroska, die sich bereitfand als Zweitgutachterin diese Arbeit durchzusehen und Herrn Dr. G. G. Winter, der mich als erfahrener Betreuer stets mit Rat und Tat unterstützt hat.

Auch bei den oben nicht erwähnten Teilnehmern der ungezählten „Meetings“ im Rahmen der Veto-Kalorimeter-Untergrundstudien möchte ich mich für die gute Zusammenarbeit bedanken: K. Flamm, U. KNecht, Dr. V. Korbelt und Dr. A. Schwind. Und obwohl die Jagd nach den verlohrenen Multimyonen schweren Herzens den Realitäten geopfert werden mußte, hat es eigentlich allen Spaß gemacht.

Den Mitgliedern der Gruppen FH1T und FH1K möchte ich auf diesem Wege für die gute Arbeitsatmosphäre danken.

Für die zügige Reparatur unzähliger elektronischer Module möchte ich dem EPOS meinen Dank aussprechen und den Ingenieuren C. Gadow und H. Jansen, die mir bei der Installation des Kalorimeters behilflich waren und auch sonst eigentlich alles im Griff hatten. Auch die Computer-Freaks vom UCO und das Personal vom Rechenzentrum („3818“) ließen mich — den USER — und mein Terminal niemals hängen. Nur mit „PF24“ blieb ich im Regen stehen: Ein deutscher Spell-Check ist für L<sup>A</sup>T<sub>E</sub>X-Dokumente nicht vorgesehen. Herrn Dr. S. Levonian sei dafür gedankt, daß er die Einbindung von L<sup>A</sup>T<sub>E</sub>X-Graphik in das oben genannte Textverarbeitungssystem ermöglichte.

Last but not least möchte ich den Raum 101 der HERA-Halle Nord erwähnen, in dem, sechs Stockwerke unter der Erdoberfläche, bei 18°C, das Gedeihen einer gesunden Elektronik sichergestellt war. Enthusiasmus und Pioniergeist entfalteteten sich dort am besten, wenn man im Hochsommer, bei Außentemperaturen von über 30°C, unten im Keller mit Pelzmantel und Biberfellmütze in der Zugluft stand, um Kabel zu stecken.

Ich versichere, daß ich diese Arbeit unter Angabe aller verwendeten Quellen und Hilfsmittel selbständig angefertigt habe.

Hamburg, den 17. Dezember 1991,

(Thomas Hunold)