Entwicklung der Simulation des ECAL Pretrigger Systems für das Experiment HERA-B und Analyse der Effizienzen des Zerfalls $J/\psi \rightarrow e^+e^-$

Dissertation
zur Erlangung des Doktorgrades
des Fachbereichs Physik
der Universität Hamburg

vorgelegt von
Joachim Flammer
aus Stuttgart

Hamburg
2001

Gutachter der Dissertation:	Dr. A. Schwarz Prof. Dr. W. Schmidt-Parzefall
Gutachter der Disputation:	Dr. A. Schwarz Prof. Dr. B. Naroska
Datum der Disputation:	12. Oktober 2001
Dekan des Fachbereichs Physik und Vorsitzender des Promotionsausschusses:	Prof. Dr. F.-W. Büßer

Kurzfassung

Das Experiment HERA-B am Deutschen Elektronen Synchrotron (DESY) wurde zur Messung der CP-Verletzung im System der B-Mesonen entwickelt. Der kleine Wirkungsquerschnitt der $b\bar{b}$-Produktion erfordert zusammen mit dem kleinen Verzweigungsverhältnis ein schnelles und leistungsfähiges Trigger System. Zur Auswahl von Ereignissen des goldenen Zerfalls ist das Trigger System auf den Nachweis des Zerfalls $J/\psi \rightarrow l^+l^-$ optimiert und teilt sich in vier Stufen auf. Als Eingangssystem für den Zerfallskanal $J/\psi \rightarrow e^+e^-$ führt das Pretrigger System des Elektromagnetischen Kalorimeters (ECAL) eine Clustersuche und -rekonstruktion im Kalorimeter durch und übergibt diese als Spurkandidaten an die erste Triggerstufe. Das Pretrigger System soll hierbei eine möglichst hohe Effizienz für den Nachweis der Elektronen und Positronen des Zerfalls des J/ψ-Mesons aufweisen und gleichzeitig eine möglichst geringe Zahl an Clustern von Untergrundereignissen liefern. Charakterisiert wird das Pretrigger System durch seine Auflösungen, seine Raten und seine Effizienzen.

Im Rahmen dieser Arbeit wurde die detailgetreue Simulation *EcalSIM* des ECAL Pretrigger Systems in einem objektorientierten Ansatz in C++ entwickelt und eine systematische Untersuchung der Leistungsfähigkeit des Pretrigger Systems, d. h. der Auflösungen, der Raten und der Effizienzen, durchgeführt.

Es wurde gezeigt, dass die Simulation die Hardware bitgenau beschreibt und in der Lage ist, die Hardware mit einer hohen Präzision zu reproduzieren und sie somit als präzises Werkzeug für physikalische Analysen zur Verfügung steht. Eine systematische Untersuchung der Auflösungen und der Leistungsfähigkeit des Pretriggers zeigte, dass der Pretrigger seine Designanforderungen erfüllt. Die Bestimmung der Effizienz für das Ende der Datennahmeperiode 2000, während der sich das Pretrigger System noch in der Inbetriebnahmephase befand ergab eine Effizienz von (6,4 ± 0,8 ± 0,6) % für den Nachweis der direkt produzierten J/ψ-Mesonen. Die erreichbaren Effizienzen für die Datennahmeperiode 2001/2 hängen stark von dem Transversalenergieschnitt des Pretriggers ab, dessen Wahl wiederum von den verarbeitbaren Raten und Reduktionsfaktoren der höheren Triggerstufen abhängt.

Development of the ECAL Pretrigger System Simulation for the Experiment HERA-B and Analysis of Efficiencies of the Decay $J/\psi \to e^+e^-$

Abstract

The experiment HERA-B at the German Electron Synchrotron (DESY) has been developed to measure CP-violation in the B-meson system. The relatively small cross section for $b\bar{b}$-production requires, together with the small branching ratio, a fast and efficient trigger system. To select golden decay events, the trigger system has been optimized for the detection of the decay $J/\psi \to l^+l^-$ and divides into four levels. The pretrigger system of the Electromagnetic Calorimeter (ECAL) serves as the input system for the decay $J/\psi \to e^+e^-$. It performs a cluster search and reconstruction algorithm in the calorimeter and provides the First Level Trigger with these clusters as track seeds. The pretrigger system should have a high as possible efficiency for electrons and positrons of the decay of the J/ψ-meson and at the same time provide a small as possible number of clusters from underlying events. The pretrigger system is characterized by its resolutions, rates and efficiencies.

Within the scope of this thesis, the detailed simulation *EcalSIM* of the ECAL pretrigger system has been developed in an object-oriented way using C++ and a systematic study of the performance of the pretrigger system, i. e. the resolutions, the rates and the efficiencies, has been performed.

It has been shown, that the simulation describes the hardware on the bit level and is able to reproduce the hardware with high accuracy and therefore acts as a precise tool for physical analyses. A systematic study of the resolutions, and the performance of the pretrigger system has shown that the pretrigger is able to fulfill its design requirements. The determination of the efficiencies for the end of the year 2000 commissioning run, yielded an efficiency of $(6{,}4 \pm 0{,}8 \pm 0{,}6)\%$ for the detection of the prompt J/ψ-mesons. The efficiencies for the running period 2001/2 will strongly depend on E_T trigger cut of the pretrigger system which depends on the maximum processing rates and reduction factors of the higher trigger levels.

Inhaltsverzeichnis

Einleitung

Ziel der Elementarteilchenphysik ist es, ein fundamentales Verständnis des Aufbaus der Materie zu erreichen und ein einziges, gemeinsamen Modell zu entwickeln, aus dem sich alle fundamentalen Teilchen, Wechselwirkungen und Eigenschaften der Materie ableiten lassen.

Das bisherige Wissen der Elementarteilchenphysik ist im so genannten *Standardmodell der Elementarteilchenphysik* zusammengefasst. Es basiert auf 16 fundamentalen Bausteinen – sechs Leptonen und sechs Quarks – sowie vier Eichbosonen (γ, $W^{\pm}$, Z^{o}, g), welche die drei verschiedenen Wechselwirkungen – elektromagnetische, schwache und starke Wechselwirkung – übertragen, und ist in der Lage, alle experimentellen Ergebnisse der Elementarteilchenphysik zu beschreiben. In einigen Bereichen ist die Theorie jedoch unvollständig, so ist bisher nur eine Vereinigung der elektromagnetischen mit der schwachen Wechselwirkung möglich, die starke Wechselwirkung wird separat behandelt und die vierte Wechselwirkung, die Gravitation, ist in ihr noch überhaupt nicht enthalten. Darüber hinaus müssen viele Annahmen und Parameter wie z. B. die Massen der fundamentalen Teilchen anhand der gemessenen Werte gesetzt werden und können nicht aus dem Modell abgeleitet werden. Das Standardmodell ist damit noch weit davon entfernt, eine alles umfassende und erklärende Theorie zu sein.

Ein wichtiger Aspekt des Verständnisses der fundamentalen Wechselwirkungen ist ihr Verhalten unter Symmetrietransformationen. Anfänglich ging man davon aus, dass alle Wechselwirkungen symmetrisch unter den Symmetrietransformationen der Spiegelung (P), der Ladungskonjugation (C) und der Zeitumkehrung (T) sind. Es stellte sich jedoch heraus, dass z. B. die schwache Wechselwirkung nicht invariant unter der Transformation P ist, sondern nur unter der kombinierten Ladungs- und Spiegeltransformation CP. In den sechziger Jahren wurde dann experimentell ebenfalls eine Verletzung der CP-Symmetrie im Bereich des Kaon-Systems gemessen [Chr 64]. Insbesondere im Bereich der B-Mesonen erwartet man eine Verletzung der CP-Symmetrie – noch dazu eine wesentlich größere als im Kaonsystem – aus deren Bestimmung sich einige der Parameter des Standardmodells besser vorhersagen lassen, wie aktuelle Ergebnisse der Experimente BaBar und Belle bestätigen [Aub 01, Abe 01].

Das ursprüngliche Ziel des Experimentes HERA-B war die Messung der CP-Verletzung im System der B-Mesonen. Es wurde als hadronische B-Fabrik am Deutschen Elektronen Synchrotron (DESY)[1] in Hamburg als magnetisches Vorwärtsspektrometer mit einem internen Drahttarget konzipiert und hatte als Schwerpunkt seines Messprogramms die Bestimmung der CP-Asymmetrie des goldenen Zerfalls $B^{o} \to J/\psi K_{s}^{o} \to J/\psi \pi^{+}\pi^{-}$.

[1]Spezielle Abkürzungen werden in dieser Arbeit bei ihrem ersten Auftreten im Text erklärt. Ein alphabetischer Index findet sich in Anhang A.

Der Detektor und das Trigger System[2] sind, wie im Folgenden noch diskutiert wird, auf die Selektion und den Nachweis von J/ψ-Mesonen optimiert. Probleme mit der außergewöhnlich herausfordernden Technik des HERA-B Detektor- und Trigger Systems haben zu einer Verzögerung im Aufbau des Experimentes geführt, sodass die physikalischen Ziele während der Datennahmeperiode 2001/2002 auf Bereiche modifiziert und erweitert wurden, die sich ebenfalls mit dem Trigger System realisieren lassen. Die neuen Ziele des Experimentes umfassen unter anderem QCD-Physik, die Untersuchung der Produktion schwerer Quarks und Charmphysik und Quarkonia [HER 00a].

Der $b\overline{b}$-Wirkungsquerschnitt $\sigma_{b\overline{b}}$ von Experimenten an e^+e^--Beschleunigern, die auf der $\Upsilon(4S)$-Resonanz arbeiten, wie das am PEP II[3]-Beschleuniger des SLAC[4] arbeitende Experiment *BaBar*[5], beträgt ungefähr $\sigma_{b\overline{b}}$=1 nb , der Wirkungsquerschnitt für Untergrundereignisse σ_{inel} ungefähr σ_{inel}=3,4 nb. Damit liegt das Signal-zu-Untergrund-Verhältnis bei etwa einem Drittel.

Experimente an hadronischen B-Fabriken besitzen den Vorteil eines höheren $b\overline{b}$-Wirkungsquerschnitts, gleichzeitig sind jedoch auch die Wirkungsquerschnitte für Untergrundereignisse deutlich höher. Bei dem Experiment HERA-B wurde bei dem Design bei einer Strahlenergie von 820 GeV von einem $b\overline{b}$-Wirkungsquerschnitt von $\sigma_{b\overline{b}}$=12 nb ausgegangen. Der Wirkungsquerschnitt für Untergrundereignisse liegt bei σ_{inel}=13 mb und damit beträgt das Signal-zu-Untergrundverhältnis nur etwa 10^{-3}.

Zusätzlich muss beachtet werden, dass die physikalisch interessanten goldenen Zerfälle ein Verzweigungsverhältnis von etwa 10^{-6} besitzen.

Die hohen Zahl an Untergrundspuren, die Überlagerung mehrerer Wechselwirkungen und der Aufbau des Experiments als Fixed-Target[6]-Vorwärtsspektrometer (vgl. Abbildung 1) erfordert einen Detektor mit entsprechend hoher Granularität und somit eine sehr große Zahl an Auslesekanälen. Bei HERA-B beträgt die Bunchcrossingrate, also die Rate mit der es zu Wechselwirkungen zwischen dem Target und dem Protonenstrahl kommt, 10 MHz. Die Gesamtdatenmenge, die pro Bunchcrossing ausgelesen und verarbeitet werden muss, beträgt 450 kByte. Wollte man diese gesamte Datenmenge bei der vollen Wechselwirkungsrate permanent speichern, so würde dies einer Datenrate von 5 TByte/s entsprechen. Diese Datenmenge kann jedoch weder komplett verarbeitet noch gespeichert oder rekonstruiert werden. Auch eine Analyse einer so großen Datenmenge ist unmöglich. Stattdessen muss durch eine Vorauswahl von physikalisch interessanten Ereignissen eine Reduktion der Datenrate erfolgen. Die typischerweise erreichbare Speicherrate liegt zur Zeit im Bereich einiger MByte/s – da die Ereignisgröße bei HERA-B nach der Rekonstruktion bei etwa 100 kByte liegt, beträgt die verarbeitbare Datenrate einige 10 Hz. Die Rate an physikalischen interessanten Ereignissen liegt in der Größenordnung von einigen Herz.

Diese Randbedingungen erfordern ein sehr leistungsfähiges Datennahme System und ein hochselektives, effizientes und schnelles Trigger System. Das Trigger System des Experimentes HERA-B teilt sich in vier Stufen auf und ist auf die Suche nach J/ψ-Mesonen

[2] engl. für Auslöse System

[3] *Positron-Electron Project* — engl. für Positron-Elektron Projekt [Ree 77]

[4] *Stanford Linear ACcelerator* — engl. für Standford Linear Beschleuniger

[5] Der Name kommt von dem $B/\overline{B}$ (gesprochen B-B-bar) System von Mesonen das am PEP-II Beschleuniger produziert wird [Aub 01a].

[6] engl. für Festes Target Experiment. Darunter versteht man Experimente die ein unbewegtes Zielmaterial verwenden, auf welches beschleunigte Teilchen geschossen werden.

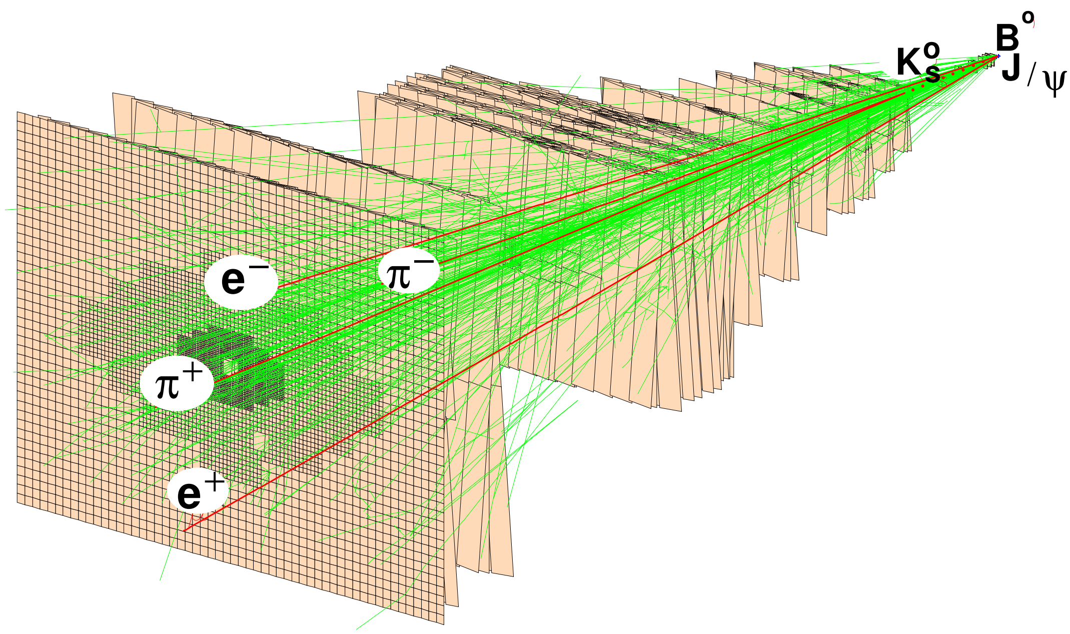


Abbildung 1: *Charakteristisches HERA-B Monte Carlo Ereignis. Dargestellt ist ein typisches Ereignis bei Betrieb des Experimentes mit vier Primärwechselwirkungen zur Verdeutlichung der Untergrundbedingungen im HERA-B Experiment. Der goldene Zerfall ist von ca. 200 geladenen Spuren überlagert [Her 00a].*

optimiert: Auf der ersten Triggerstufe findet der Nachweis des Zerfalls $J/\psi \rightarrow e^+e^-$ und $J/\psi \rightarrow \mu^+\mu^-$ durch eine Spursuche und -rekonstruktion sowie durch die Bestimmung der invarianten Masse statt. Die zur Spursuche notwendigen Startsuchregionen liefern drei Pretrigger Systeme[7].

Inhalt dieser Arbeit ist die Beschreibung, Simulation und Untersuchung des Pretrigger Systems des Elektromagnetischen Kalorimeters (ECAL)[8], das die Informationen des Kalorimeters für die Suche und Rekonstruktion möglicher Spurkandidaten im Kalorimeter verwendet. Es liefert somit die Eingangsdaten der gesamten Triggerkette zum Nachweis des Zerfalls $J/\psi \rightarrow e^+e^-$und dementsprechend hängt von seiner Effizienz und Leistungsfähigkeit die Effizienz des gesamten Messungen ab.

Im Rahmen dieser Arbeit wurde zunächst eine detailgetreue Simulation des ECAL Pretriggers mittels eines objektorientierten Ansatz in C++ entwickelt. Zur Überprüfung der Übereinstimmung der Simulation mit der Pretrigger Hardware, sowie zur Untersuchung von Fehlfunktionen der Hardware und Ungenauigkeiten der Beschreibung der Simulation, erfolgte ein Vergleich der Simulation mit der Hardware mittels speziell aufgezeichneter Daten. Mit Hilfe der Simulation wurde anschließend die Funktions- und Leistungsfähigkeit des Pretrigger Systems untersucht, und mit denen einer idealen Kalorimeterrekonstruktion verglichen. Darüber hinaus wurden die Effizienzen für den Nachweis direkt produzierter J/ψ-Mesonen und J/ψ-Mesonen des goldenen Zerfalls bestimmt.

Die Arbeit gliedert sich in sieben Kapitel. Zunächst erfolgt im ersten Kapitel eine Darstellung der theoretischen Grundlagen des ursprünglichen physikalischen Zieles des Experimentes HERA-B, der Messung der CP-Verletzung, die den Anforderungen und dem

[7] engl. für Vorauslöse Systeme

[8] *Electromagnetic CALorimeter* — engl. für Elektromagnetisches Kalorimeter

Aufbau des Trigger und Datennahme System zugrunde liegt, sowie der neuen, mit diesem Trigger System möglichen, physikalischen Ziele, wie die Untersuchung der Produktion schwerer Quarks. Im zweiten Kapitel wird anschließend ein Überblick über das Detektorsystem HERA-B gegeben, wobei auf das Elektromagnetische Kalorimeter, das die Eingangsdaten des ECAL Pretriggers liefert, vertieft eingegangen wird. Im dritten Kapitel erfolgt die Darstellung des Trigger Systems, in dessen Rahmen sich das ECAL Pretrigger System einordnet. Dabei wird sowohl auf die Strategien als auch auf die technische Implementation des Trigger Systems eingegangen.

Im vierten Kapitel erfolgt eine detaillierte Darstellung des ECAL Pretrigger Systems sowie der Umsetzung des Systems in die Simulation *EcalSIM*. Die Kapitel fünf bis sieben widmen sich der eigentlichen Untersuchung des Pretrigger Systems mit Hilfe der Simulation: Zunächst erfolgt in Kapitel fünf eine generelle Untersuchung der Funktion und Leistungsfähigkeit des Pretrigger Systems mit seinen Auflösungen und Effizienzen. In Kapitel sechs erfolgt anschließend mittels eines Vergleiches von simulierten Daten mit durch den Detektor aufgezeichneten Daten die Untersuchung, wie genau die Simulation in der Lage ist, die Hardware zu beschreiben. Kapitel sieben schließt die Untersuchungen durch Bestimmung der während der Datennahmeperiode 2000 erzielten Pretriggereffizienzen für den Nachweis des Zerfalls direkter J/ψ-Mesonen und J/ψ-Mesonen des goldenen Zerfalls und durch eine Diskussion möglicher Effizienzsteigerungen ab.

Kapitel 1

Theoretische Grundlagen

1.1 Symmetrien in der Physik

Symmetrien, wie die Invarianz unter Drehungen, räumlicher Translation oder zeitlicher Verschiebung, sind in der Physik seit einigen hundert Jahren bekannt. Im Jahre 1918 bewies Emmy Noether [Noe 18], dass für jede kontinuierliche Symmetrie eine zugehörige Erhaltungsgröße existiert — die angeführten Symmetrien führen z. B. jeweils zur Erhaltung des Drehimpulses, des Impulses bzw. der Energie.
Man teilt die Symmetrien in zwei Gruppen auf: Symmetrien wie die oben angeführten, gehören zur Gruppe der *kontinuierlichen Symmetrien*, bei der jedes Element der Transformation durch eine Serie von Anwendung eines infinitesimalen Generators erreicht werden kann. Daneben existiert die Gruppe der *diskreten Symmetrien*, wie die Invarianz unter räumlicher Spiegelung (Parität P). Diese Gruppe der Spiegelungen besitzt nur zwei Elemente, den Operator $\mathbf{O} = \mathbf{O}^{-1}$ und die Identität $\mathbf{I}$. Diskrete Symmetrien wurden anfänglich in ihrer Bedeutung unterschätzt.[1] Sie führen aber im Rahmen des Wigner-Eckhart-Theorems zu Auswahlregeln für Übergänge und haben sich als wertvolles Werkzeug im Verständnis der Wechselwirkungen von Elementarteilchen gezeigt.
Neben der räumlichen Parität P existieren zwei weitere wichtige Symmetrien, die Zeitumkehrsymmetrie T und die Ladungskonjugation C, die in ihrer kombinierten Anwendung die essentielle Symmetrie der Quantenfeldtheorie darstellen.

1.1.1 Raumspiegelung *P*

Die so genannte Raumspiegelung, auch *Parität P* genannt, entspricht der räumlichen Spiegelung am Koordinatenursprung und ist mit Abstand die bekannteste Symmetrie. In der klassischen Mechanik und vor Einführung der Quantenmechanik war es nicht möglich, eine Theorie zu entwickeln, die Wechselwirkungen enthält, welche die Parität verletzen.
Die Auswirkung der Parität P auf Vektoren hängt von der Art der Vektoren ab: Während polare Vektoren wie der Ort und der Impuls ihr Vorzeichen ändern, bleiben axiale Vektoren wie der Drehimpuls unter der Paritätsoperation unverändert:

$$\vec{r} \xrightarrow{\mathbf{P}} -\vec{r} \qquad \vec{p} \xrightarrow{\mathbf{P}} -\vec{p} \qquad \vec{L} = \vec{r} \times \vec{p} \xrightarrow{\mathbf{P}} (-\vec{r}) \times (-\vec{p}) = \vec{L} \tag{1.1}$$

[1] Wigner sagte 1927 zum Paritätsoperator P: „Man wird ihn nur selten gebrauchen können da er nur zwei Eigenwerte (±) hat und so wenig auszusagen vermag“ [Wig 27].

Da der Paritätsoperator sein eigener inverser Operator ist, gilt für die zweimalige Anwendung:

$$\mathbf{P} \cdot \mathbf{P} = \mathbf{P^2} = \mathbf{I} \ . \tag{1.2}$$

In der Quantenmechanik wird jedem Teilchen eine Parität P zugewiesen, die entsprechend der Eigenwerte des Paritätsoperators ± 1 sein kann. Zerfällt ein Teilchen a mit der Parität P_a in die beiden Teilchen b und c mit den Paritäten P_b und P_c, dann verlangt die Erhaltung der Parität

$$P_a = P_b \cdot P_c \cdot (-1)^l \ , \tag{1.3}$$

wobei l die Quantenzahl des relativen Bahndrehimpulses des Endzustands ist. Für jede Wechselwirkung bei der diese Gleichung nicht gilt, spricht man von *Paritätsverletzung*.
Die klassische Newtonsche Bewegungsgleichung für ein Punktteilchen unter einer elektromagnetischen oder gravitativen Kraft $\vec{F}$ einer am Nullpunkt verankerten Punktladung (-masse) lautet

$$m\frac{d^2\vec{r}}{dt^2} = \vec{F} \qquad \text{mit} \qquad \vec{F} = \frac{C}{r^2}\hat{\mathbf{r}} \tag{1.4}$$

wobei C eine Konstante und $\hat{\mathbf{r}}$ der Einheitsvektor in Richtung von $\vec{r}$ ist. Man erkennt, dass Gleichung 1.4 auch unter der Paritätsoperation $\mathbf{P}$ erhalten ist. Für die Maxwell-Gleichungen gilt dies analog, sodass die Gravitation und die elektromagnetische Kraft invariant unter der Parität sind. Auch für die starke Wechselwirkung ist die Parität erhalten, die schwache Wechselwirkung verletzt dagegen diese Symmetrie.

Verletzung der Symmetrie P

Im Jahre 1956 schlugen T. D. Lee und C. N. Yang [Lee 56] einen Test der Paritätserhaltung in der schwachen Wechselwirkung vor, der ein Jahr später von C. S. Wu [Wu 57] in Brookhaven durchgeführt wurde und die Verletzung der Parität experimentell bestätigte. In dem Experiment wurden die Spins radioaktiver Kobaltkerne mit dem Drehimpuls $J = 5$ bei tiefen Temperaturen in einem Magnetfeld ausgerichtet und die Flugrichtung der Elektronen aus dem β-Zerfall aufgezeichnet:

$$Co^{60}(J=5) \quad \rightarrow \quad Ni^{60}(J=4) \ + \ e^- \ + \ \overline{\nu_e} \ . \tag{1.5}$$

Wäre die Parität erhalten, so müsste die Wahrscheinlichkeit, Elektronen in Richtung des Spins des Kobaltkerns und in entgegengesetzter Richtung zu messen, gleich sein. Die Messung der Flugrichtung ergab jedoch, dass die Elektronen häufiger entgegengesetzt zum Spin des Kobaltkerns emittiert wurden, als parallel dazu. Die gemessene Asymmetrie stellte somit den ersten Beweis für eine Verletzung der Parität in der schwachen Wechselwirkung dar.
Die Verletzung der Parität lässt sich durch longitudinale Polarisation der Leptonen erklären: Unter *rechtshändigen Teilchen* versteht man Teilchen, deren Spin in Bewegungsrichtung des Teilchens zeigt, unter *linkshändigen Teilchen* versteht man Teilchen, deren Spin entgegengesetzt zur Bewegungsrichtung zeigt. Da die Paritätsoperation die Bewegungsrichtung des Teilchens umkehrt, den Drehimpuls jedoch unverändert lässt, überführt sie rechtshändige Teilchen in linkshändige und umgekehrt. Bei schwachen Zerfällen mittels geladener Ströme, wie beim β-Zerfall in (1.5), werden aber nur linkshändige Teilchen und rechtshändige Antiteilchen erzeugt, sodass das Antineutrino in (1.5) stets rechtshändig produziert wird. und so die Parität in der schwachen Wechselwirkung nicht erhalten ist.

1.1.2 Zeitumkehr *T*

Die *zeitliche Spiegelung* T entspricht der Invertierung der Zeitachse:

$$t \xrightarrow{\mathbf{T}} -t \qquad r \xrightarrow{\mathbf{T}} r \qquad p \xrightarrow{\mathbf{T}} -p \tag{1.6}$$

In der klassischen Mechanik ist die Newtonsche Bewegungsgleichung 1.4 eine Gleichung zweiter Ordnung in den Zeitableitungen und damit unter Zeitumkehr invariant. Das gleiche gilt auch für die Maxwell-Gleichungen. Für elektromagnetische und gravitative Kräfte ist somit die Zeitumkehr erhalten. Allerdings sind nicht alle makroskopischen Systeme zeitumkehr-invariant. In der statistischen Mechanik ist für Ensembles makroskopischer Systeme eine eindeutige Richtung des Zeitflusses definiert: die Richtung zunehmender Entropie (Unordnung). Auf makroskopischer Ebene ist jedoch die Zeitumkehr-Symmetrie erhalten. In der Quantenmechanik führt der Operator **T** jeden Zustand in seinen komplex konjugierten Zustand über, sodass ein komplexer Hamiltonian die Symmetrie T verletzen würde. Für die Zeitumkehr existieren erste Hinweise auf eine Verletzung in der schwachen Wechselwirkung [Aff 98, Ang 98].

1.1.3 Teilchen-Antiteilchen-Konjugation *C*

Neben den beiden räumlichen Symmetrieoperationen P und T existiert noch eine dritte Symmetrie, welche nur die inneren Eigenschaften der quantenmechanischen Zustände verändert, die Raum-Zeit-Koordinaten jedoch unverändert lässt. Die *Ladungskonjugation* C invertiert die inneren additiven Quantenzahlen der Zustände (wie die elektrische Ladung q, die Leptonzahl oder die Baryonzahl) und überführt damit die Teilchen in ihre Antiteilchen:

$$q \xrightarrow{\mathbf{C}} -q \qquad r \xrightarrow{\mathbf{C}} r \qquad t \xrightarrow{\mathbf{C}} t \tag{1.7}$$

Da die elektrische Ladung die Quelle der elektromagnetischen Felder $\vec{E}$ und $\vec{B}$ darstellt, transformieren sich die beiden Felder analog wie die elektrische Ladung und die Maxwell-Gleichungen sind auch unter der Ladungskonjugations-Transformation erhalten.
In der Quantenmechanik ist ein Teilchen Eigenzustand von **C**, wenn es sein eigenes Antiteilchen ist. Beispiele dafür sind das Photon, das π^o und das ρ^o. Ebenso wie die elektromagnetische Wechselwirkung ist auch die starke Wechselwirkung gegenüber der Ladunkgskonjugation C invariant. Beide behandeln somit Teilchen und Antiteilchen gleich. Die schwache Wechselwirkung verletzt dagegen diese Symmetrie [Per 99].

Verletzung der Symmetrie *C*

Die Verletzung der Symmetrie in C wurde 1957 im Zerfall $\pi^+ \to \mu^+\nu_\mu$ nachgewiesen [Gar 57, Fri 57]. Wäre die C-Parität erhalten, so sollten die Myonen aus diesem Zerfall keine Polarisation entlang ihrer Flugrichtung aufweisen. Die Messung der Polarisation, durch Messung der Zerfallsprodukte $e\nu_e\nu_\mu$ des Myons, ergab jedoch, dass die Myonen stark polarisiert sind und somit den Beweis für die Verletzung der C-Symmetrie in der schwachen Wechselwirkung.

1.1.4 Kombinierte Symmetrie *CPT*

Obwohl für die schwache Wechselwirkung eine Verletzung der einzelnen Symmetrien C,P und T nachgewiesen wurde, stellt die Kombination aller drei Operationen, CPT, eine

Symmetrie für alle Wechselwirkungen, auch für die schwache Wechselwirkung, dar. Das CPT-Theorem leitet sich von den Axiomen der Quantenfeldtheorien ab und ergibt sich z. B. aus den Forderungen nach Lorentz-Invarianz der Theorien. Aus der CPT-Invarianz folgt z. B., dass Teilchen und Antiteilchen die gleiche Masse und die gleiche Lebensdauer besitzen. Das CPT-Theorem deckt sich mit allen zur Zeit bekannten experimentellen Beobachtungen, sodass davon ausgegangen wird, dass CPT eine echte Symmetrie ist [Das 95].

1.1.5 Verletzung der kombinierten Symmetrie *CP*

Nach Entdeckung der Verletzung der Symmetrien C und P in der schwachen Wechselwirkung ging man davon aus, dass zumindest die kombinierte Symmetrie CP in der schwachen Wechselwirkung erhalten ist, da die kombinierte Anwendung der Operationen C und P rechtshändige Teilchen wieder in rechtshändige Teilchen und linkshändige Teilchen wieder in linkshändige Teilchen überführt. Ist eine Wechselwirkung invariant unter der Operation CP, so bedeutet dies, dass ein Prozess von einem Ausgangs- in einen Endzustand mit derselben Wahrscheinlichkeit abläuft, wie ein Prozess der den CP-konjugierten Eingangszustand in den CP-konjugierten Ausgangszustand überführt.
Im Jahre 1964 wurde experimentell nachgewiesen, dass auch die kombinierte Symmetrie CP in der schwachen Wechselwirkung nicht erhalten ist, wenn auch die Verletzung weit aus geringer ist, als die der einzelnen Symmetrien: Christenson, Cronin und Fitch beobachteten den Zerfall des langlebigen neutralen Kaons K_L^o in einen Endzustand mit zwei Pionen (CP=+1) und (dominierend) in einen Endzustand mit drei Pionen (CP=–1). Offensichtlich ist der Masseneigenzustand K_L^o der schwachen Wechselwirkung, der als Überlagerung der beiden in der starken Wechselwirkung erzeugten Zustände $|K^o>$ und $|\overline{K^o}>$ angesehen wird,

$$|K_L^o> = \; p \, |K^o> \; + q \, |\overline{K^o}> \qquad p, q \in C \tag{1.8}$$

nicht gleichzeitig Eigenzustand von CP.
Die bislang gemessene CP-Verletzung der schwachen Wechselwirkung wird von dem heute gültigen Modell der Elementarteilchenphysik, dem Standardmodell, beschrieben. Teilchen, die b-Quarks enthalten, sind neben dem Kaon ein weiteres System, in dem man CP-Verletzung erwartet. In den nächsten Abschnitten wird zunächst das Standardmodell und die Beschreibung der schwachen Wechselwirkung dargestellt, bevor auf die Messung der CP-Verletzung im B-Mesonen-System eingegangen wird.

1.2 Das Standardmodell

Das Standardmodell der Elementarteilchenphysik besteht aus zwei Quantenfeldtheorien (Quantenchromodynamik (QCD) und Elektroschwache Theorie) welche die starke, die elektromagnetische und die schwache Wechselwirkung beschreiben. Die vierte bekannte Wechselwirkung, die Gravitation, konnte bislang noch nicht eingebunden werden.
Das Standardmodell enthält mehrere freie Parameter, welche z. B. die Masse der Teilchen definieren oder die Stärke der drei Wechselwirkungen beschreiben, und die nicht von der Theorie vorhergesagt werden, sondern experimentell bestimmt werden müssen.

Die elementaren Felder des Standardmodells sind Leptonen, Quarks und Eichbosonen sowie das Higgsboson. Insgesamt sind sechs verschiedene „Flavor“[2] von Leptonen, sechs Flavor von Quarks und vier Arten von Eichbosonen bekannt. Die Leptonen und Quarks besitzen alle den Spin $^1/_2$ und werden als Fermionen bezeichnet. Sie teilen sich in drei Familien aus Paaren auf, bei denen jeweils die einzelnen Paare abgesehen von ihrer Masse die gleichen Eigenschaften besitzen, wie die anderen Paare. Die Eichbosonen besitzen alle Spin 1. Tabelle 1.1 fasst die Teilchen mit einigen ihrer Größen zusammen.

Leptonen		
Teilchen	Masse (MeV/c^2)	Ladung
e	0,511	-1
ν_e	$< 3 \cdot 10^{-6}$	0
μ	106	-1
ν_μ	$<$ 0,19	0
τ	1777	-1
ν_τ	$<$ 18,2	0

Quarks		
Teilchen	Masse (MeV/c^2)	Ladung
d	3 - 9	-1/3
u	1 - 5	2/3
s	75 - 170	-1/3
c	(1,15 - 1,35)·10^3	2/3
b	(4,0 - 4,4)·10^3	-1/3
t	(174,3 $\pm$ 5,1)·10^3	2/3

Eichbosonen		
Teilchen	Masse (MeV/c^2)	Ladung
Photon (γ)	$< 2 \cdot 10^{-22}$	0
Gluon (g)	0	0
$W^\pm$	80,42·10^3	$\pm$1
Z^o	91,18·10^3	0

Tabelle 1.1: *Elementarteilchen des Standard Modells. Jedes der Teilchen besitzt ein Antiteilchen mit entgegengesetzter Ladung – die Ausnahme bilden das γ, Z^o und g die ihre eigenen Antiteilchen sind. Die Gluonmasse stellt die theoretische Vorhersage dar, Massen bis zu einigen wenigen MeV/c^2 werden experimentell nicht ausgeschlossen. Alle Werte wurden aus [Cas 00] entnommen.*

Die Wechselwirkungen der Fermionen untereinander wird durch den Austausch der Eichbosonen beschrieben: Die schwache Wechselwirkung wird durch die geladenen, massebehafteten Bosonen $W^\pm$ und Z^o übertragen, die elektromagnetische Wechselwirkung durch die masselosen Photonen γ und die starke Wechselwirkung durch die Gluonen g. Das Standardmodell verknüpft jeweils zwei Fermionen mit einem Boson oder drei bzw. vier Bosonen miteinander. Die relativen Stärken dieser Kopplungen werden durch die Lagrangedichte des Standardmodells $\mathcal{L}_{SM}$ festgelegt. Die absoluten Kopplungsstärken werden durch die Elementarladungen der elektrischen, schwachen und starken Wechselwirkung festgelegt, die als freie Parameter in die Theorie eingehen.
Alle Teilchen des Standardmodells werden zunächst als masselos angesehen. Erst durch den so genannten *Higgs-Mechanismus* erhalten die Teilchen Masse [Gla 61],[Wei 67]. Zu diesem Zweck wird das skalare Higgsfeld ϕ eingeführt, welches an die Fermionen und Eichbosonen sowie an sich selbst koppelt.
Im nächsten Abschnitt wird gezeigt, wie die CP-Verletzung im Standardmodell erklärt wird. Die Diskussion folgt dabei weitgehend den Darstellung in [Nir 99] und [Har 98].

[2] engl. für Geschmacksrichtung, hier: Sorten

1.3 CP-Verletzung im Standardmodell

Der Lagrangian des Standardmodells setzt sich aus der Kopplung der Fermionen an die Eichbosonen und die Eichbosonen untereinander ($\mathcal{L}_{Kopp}$), der Kopplung des Higgsfelds ($\mathcal{L}_{Higgs}$) sowie der Yukawa-Wechselwirkung der Fermionen mit dem Higgsfeld ($\mathcal{L}_{Yukawa}$) zusammen:

$$\mathcal{L}_{SM} = \mathcal{L}_{Kopp} + \mathcal{L}_{Higgs} + \mathcal{L}_{Yukawa}\ . \tag{1.9}$$

Sowohl die Kopplung der Fermionen und Bosonen, als auch in einfachster Realisierung die Kopplung des Higgsfelds, erhalten die CP Symmetrie [Nir 99]. Wie in [Nir 99] gezeigt, führt jedoch die Yukawa-Wechselwirkung, sofern sie komplexe Anteile besitzt, zu einer Verletzung der CP-Symmetrie.
Die Yukawa-Wechselwirkung setzt sich aus den drei Teilen, Kopplung der linkshändigen Quarks an die rechtshändigen d-artigen Quarks (d,s,b), Kopplung der linkshändigen Quarks an die rechtshändigen u-artigen Quarks (u,c,t), sowie Kopplung der linkshändigen Leptonen an die rechtshändigen Leptonen zusammen. Bezüglich der Wechselwirkungseigenzustandsbasis I ergibt sich die Yukawa-Wechselwirkung zu[3]

$$-\mathcal{L}_{Yukawa} \;=\; (Y^d_{ij})\ \overline{Q^I_{L_i}}\ \phi\ d^I_{R_j} \;+\; (Y^u_{ij})\ \overline{Q^I_{L_i}}\ \phi\ u^I_{R_j} \;+\; (Y^l_{ij})\ \overline{L^I_{L_i}}\ \phi\ l^I_{R_j} \;+\; h.c.\,. \tag{1.10}$$

$Y^{(d,u,l)}_{ij}$ sind hierbei die Yukawa-Kopplungskonstanten, $Q^I_{L_i}$ und $L^I_{L_i}$ die Wellenfunktionen der linkshändigen Quarks und Leptonen mit

$$Q^I_{L_i} = \begin{pmatrix} u^I_{L_i} \\ d^I_{L_i} \end{pmatrix} \qquad \text{und} \qquad L^I_{L_i} = \begin{pmatrix} \nu^I_{L_i} \\ l^I_{L_i} \end{pmatrix} \tag{1.11}$$

sowie $d^I_{R_j}$, $u^I_{R_j}$ und $l^I_{R_j}$ die Wellenfunktionen der rechtshändigen d-artigen und u-artigen Quarks bzw. der rechtshändigen Leptonen.
Wie oben erwähnt, erhalten die Fermionen durch den so genannten Higgs-Mechanismus und das skalare Feld ϕ endliche Massen. Da der Grundzustand des Higgs-Potentials bezüglich elektroschwacher Eichtransformationen kontinuierlich entartet ist, führt die Wahl eines konkreten Vakuumerwartungswerts zu einer spontanen Symmetriebrechung. Im Standardmodell wird angesetzt, dass das neutrale Higgsfeld einen von Null verschiedenen Erwartungswert v im Vakuum besitzt und der Erwartungswert des geladenen Higgsfelds verschwindet. Entwickelt man nun die Lagrangedichte um den Grundzustand des Higgsfelds, so kann man die Terme der Yukawa-Wechselwirkung in zwei Teile – einen für die reine Wechselwirkung und einen für die Masse der Fermionen – aufteilen. Für die d-artigen, u-artigen und negativ geladenen Leptonen besitzen die Massenterme die Form

$$-\mathcal{L}_M \;=\; \overline{d^I_{L_i}}\ (\mathcal{M}^d)_{ij}\ d^I_{R_j} \;+\; \overline{u^I_{L_i}}\ (\mathcal{M}^u)_{ij}\ u^I_{R_j} \;+\; \overline{l^I_{L_i}}\ (\mathcal{M}^l)_{ij}\ l^I_{R_j} + h.c. \tag{1.12}$$

mit den drei Massenoperatoren $\mathcal{M}^{d,u,l}$. Die Massen der Fermionen werden, wie oben erwähnt, nicht durch das Standardmodell vorhergesagt, sondern müssen experimentell bestimmt werden. Die Massenoperatoren ergeben sich aus den Yukawa-Kopplungskonstanten und dem Vakuumwert des Higgsfelds zu

$$M^{(u,d,l)} \;=\; \frac{v}{\sqrt{2}}\, Y^{(u,d,l)}\ . \tag{1.13}$$

[3]Hierbei wird das Neutrino als masselos und als Dirac-Teilchen angenommen, was eine gute Näherung ist.

Da die Standardmodell Neutrinos keine Yukawa-Wechselwirkung besitzen, werden sie als masselos vorhergesagt. Die Massenbasis entspricht per Definition diagonalen Massenmatrizen und man kann immer unitäre links- und rechtshändige Matrizen $V_L^{(u,d)}$ und $V_R^{(u,d)}$ dergestalt finden, dass gilt:

$$\mathcal{M}_{diag}^{(u,d)} = V_L^{(u,d)}\, \mathcal{M}^{(u,d)}\, V_R^{(u,d)\dagger}, \tag{1.14}$$

wobei $\mathcal{M}_{diag}^{(u,d)}$ diagonal und real ist. Die Masseneigenzustände ergeben sich aus den Wechselwirkungseigenzuständen dann zu

$$\begin{aligned}
u^M_{(L,R)} &= V^u_{(L,R)}\; u^I_{(L,R)} && \text{für u,c,t,} && (1.15)\\
d^M_{(L,R)} &= V^d_{(L,R)}\; d^I_{(L,R)} && \text{für d,s,b,} && (1.16)\\
l^M_{(L,R)} &= V^l_{(L,R)}\; l^I_{(L,R)} && \text{für Leptonen,} && (1.17)\\
\text{und} \quad \nu^M_{(L,R)} &= V^\nu_{(L,R)}\; \nu^I_{(L,R)} && \text{für Neutrinos .} && (1.18)
\end{aligned}$$

Da die Neutrinos im Standardmodell als masselos angenommen werden, ist $V^\nu_{(L,R)}$ beliebig wählbar.
Die geladenen schwachen Ströme für Quarks (also die Wechselwirkung mit den $W^\pm$-Eichbosonen) lassen sich damit in der Massenbasis schreiben als

$$-\mathcal{L}_{W^\pm} \quad \propto \quad \overline{u^M_{L_i}}\gamma^\mu\; (V^u_L V^{d\dagger}_L)_{ij}\; d^M_{L_j} W^+ \quad + \; h.c.\; . \tag{1.19}$$

Die unitäre 3×3 Matrix

$$V_{CKM} = V^u_L\; V^{d\dagger}_L \;\; \text{mit} \;\; V_{CKM} V^\dagger_{CKM} = \mathbf{1} \tag{1.20}$$

stellt die *Cabibbo-Kobayashi-Maskawa* (CKM) Mischungsmatrix dar.

1.4 Die Cabbibo-Kobayashi-Maskawa- Matrix (CKM)

Wie im vorherigen Abschnitt gezeigt, werden die Quark-Masseneigenzustände (d^M, s^M, b^M) durch die CKM-Matrix in die Eigenzustände der schwachen Wechselwirkung (d^I, s^I, b^I) überführt. Für drei Generationen von Quarks ist die CKM-Matrix eine unitäre 3×3-Matrix:

$$\begin{pmatrix} d^I \\ s^I \\ b^I \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} V_{ud} & V_{us} & V_{ub} \\ V_{cd} & V_{cs} & V_{cb} \\ V_{td} & V_{ts} & V_{tb} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} d^M \\ s^M \\ b^M \end{pmatrix} . \tag{1.21}$$

Statt (d, s, b) könnten auch die Zustände (u, c, t) rotiert werden – die Wahl welches der Tripletts rotiert wird, ist reine Konvention, im allgemeinen wählt man die Zustände so, dass für die (u, c, t) die Masseneigenzustände gleich den Wechselwirkungseigenzuständen sind [Coh 77].
Die Eichbosonen der schwachen Wechselwirkung koppeln an die Dubletts der Wechselwirkungseigenzustände

$$\begin{pmatrix} u^I \\ d^I \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} c^I \\ s^I \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} t^I \\ b^I \end{pmatrix} . \tag{1.22}$$

Die komplexe 3×3-Matrix V_{CKM} besitzt neun komplexe und neun reelle Parameter. Durch die Unitaritätsbedingung der Matrix können neun Parameter eliminiert werden, weitere fünf Phasen lassen sich durch Redefinition der relativen Phasendifferenzen zwischen den Quarkfeldern eliminieren, sodass vier Parameter übrig bleiben: drei reelle Mischungswinkel α, β und γ sowie die komplexe Phase φ. CP-Verletzung tritt im Standardmodell genau dann auf, wenn die Phase $\varphi \neq 0$ ist. Da die vier Parameter durch das Standardmodell nicht vorhergesagt werden, müssen sie experimentell bestimmt werden.

Gäbe es im Standardmodell nur zwei Quarkfamilien, so entspräche die CKM-Matrix einer zweidimensionalen Drehmatrix, die durch entsprechende Konventionen immer reell gewählt werden kann. CP-Verletzung tritt also nur dann auf, wenn mindestens drei Teilchenfamilien existieren. Im Gegensatz zum Quarksektor tritt im Leptonsektor keine CP-Verletzung auf: Die der CKM-Matrix entsprechende Matrix $V_{MNS} = V_L^{\nu} V_L^{l}$ im Leptonsektor kann aufgrund der beliebigen Wahl von V_L^{ν} (vgl. Gleichung 1.18) immer in die Form einer Einheitsmatrix gebracht werden [Mak 62]. Neuere Experimente [Fuk 98], welche die Neutrino-Oszillation untersuchen, weisen jedoch darauf hin, dass auch die Neutrinos eine Masse besitzen, sodass im Leptonbereich eine ähnliche CP-Verletzung wie im Quarkbereich zu erwarten ist.

Modelle außerhalb des Standardmodells sagen weitere Quellen für das Auftreten von CP-Verletzung voraus, innerhalb des Standardmodells ist die komplexe Phase jedoch die einzige Quelle für das Auftreten einer CP-Verletzung. Mit einer Messung der Größe der CP-Verletzung lässt sich damit die Gültigkeit des Standardmodells in diesem Bereich testen.

1.4.1 Wolfenstein-Parametrisierung der CKM-Matrix

Es ist üblich, die CKM-Matrix mittels der vier Wolfensteinparameter (λ, A, ρ, η) mit $\lambda = |V_{us}| = \sin\theta_c = 0,22$ als Entwicklungsparameter und η als Repräsentation der CP-verletzenden Phase zu parametrisieren [Wol 83]. θ_c ist der so genannte Cabibbo-Winkel, der die Mischung zwischen down- und strange-Quarks beschreibt:

$$\mathbf{V_{CKM}} = \begin{pmatrix} 1-\frac{\lambda^2}{2} & \lambda & \lambda^3 A(\rho - i\eta) \\ -\lambda & 1-\frac{\lambda^2}{2} & \lambda^2 A \\ \lambda^3 A(1-\rho-i\eta) & -\lambda^2 A & 1 \end{pmatrix} + \mathcal{O}(\lambda^4) \qquad (1.23)$$

Da λ klein ist, sind die Werte der Hauptdiagonale nahezu eins, die Werte der Nebendiagonalen werden mit zunehmendem Abstand zur Hauptdiagonale kleiner – damit ist die Mischung der dritten Quarkgeneration mit den beiden anderen Quarkgenerationen am schwächsten ausgeprägt.

1.4.2 Unitaritätsbeziehungen und Unitaritätsdreieck

Die in Gleichung 1.20 angeführte Unitarität der CKM-Matrix besitzt eine große Bedeutung für das Verständnis der CP-Verletzung und der Quarkmischungen. Ausgeschrieben liefert sie neun Gleichungen, welche die Orthogonalität je zweier Spalten bzw. Reihen wiedergeben:

$$\sum_{i=d,s,b} V_{\alpha_i} V^*_{\alpha_i} \;=\; 1 \qquad\qquad \alpha \in \{u,c,t\} \;, \tag{1.24}$$

$$\sum_{\alpha=u,c,t} V_{\alpha_i} V^*_{\alpha_j} \;=\; 0 \qquad i \neq j \quad \text{und} \quad i,j \in \{d,s,b\} \;, \tag{1.25}$$

$$\sum_{i=d,s,b} V_{\alpha_i} V^*_{\beta_i} \;=\; 0 \qquad \alpha \neq \beta \quad \text{und} \quad \alpha,\beta \in \{u,c,t\} \;. \tag{1.26}$$

Da alle Gleichungen verlangen, dass die Summe dreier komplexer Zahlen Null ergibt, kann man sie geometrisch in der komplexen Ebene als Dreiecke, den so genannten *Unitaritätsdreiecken* darstellen [Ale 94].
Ausgeschrieben ergibt die Gleichung für das B-Mesonen System

$$V_{ud}V^*_{ub} \;+\; V_{cd}V^*_{cb} \;+\; V_{td}V^*_{tb} \;=\; 0 \;. \tag{1.27}$$

Setzt man in Gleichung 1.27 die Wolfensteinparametrisierung (vgl. Gleichung 1.23 und 1.21) ein, so erhält man eine Abschätzung der Seitenlängen des Dreiecks in Potenzen des Entwicklungsparameters λ. In diesem Dreieck sind alle drei Seitenlängen in der Größenordnung von λ^3 und damit alle drei Winkel relativ groß. In anderen Dreiecken tritt jeweils eine sehr kurze Seite auf, welche die Dreiecke mehr oder weniger zu einer Geraden entarten lässt. Abbildung 1.1 zeigt drei der Unitaritätsdreiecke im Vergleich. Dies gibt ein intuitives Verständnis, warum CP-Verletzung in den dominierenden Kaon-Zerfällen (Dreieck (a)) und in den dominierenden B_s-Zerfällen (Dreieck (b)) klein ist. Die faszinierendste Physik liegt im B-Meson-System, das durch Dreieck (c) repräsentiert wird. Die Größe der Fläche dieses Dreiecks sagt große CP-Verletzung in Zerfällen der B-Mesonen voraus. Es ist gut bestimmbar und steht deshalb im Mittelpunkt der experimentellen und theoretischen Untersuchungen und wird daher meistens als das „Unitaritätsdreieck“ bezeichnet.
Die drei Winkel des Unitaritätsdreieckes werden mit α, β und γ bezeichnet und ergeben sich aus den CKM-Matrixelementen zu

$$\alpha \equiv \arg\left(-\frac{V_{td}V^*_{tb}}{V_{ud}V^*_{ub}}\right) \qquad \beta \equiv \arg\left(-\frac{V_{cd}V^*_{cb}}{V_{td}V^*_{tb}}\right) \qquad \gamma \equiv \arg\left(-\frac{V_{ud}V^*_{ub}}{V_{cd}V^*_{cb}}\right) \tag{1.28}$$

Abbildung 1.2 zeigt das Unitaritätsdreieck und das auf die Länge $V_{cd}V_{cb} = 1$ reskalierte Dreieck in der ρ-η-Ebene. Die Spitze des reskalierten Dreiecks liegt bei (ρ, η), die Höhe des Dreiecks entspricht somit dem imaginären Parameter $i\eta$ der CKM-Matrix und ist ein Maß für die Größe der CP-Verletzung.

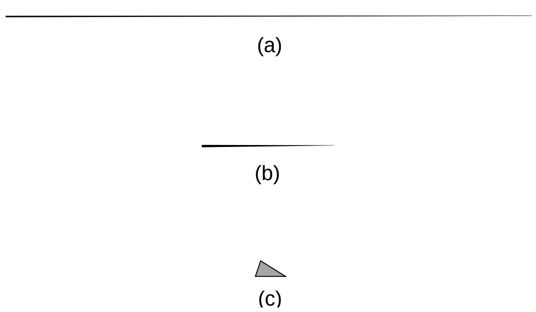


Abbildung 1.1: *Drei Unitaritätsdreiecke im Vergleich: (a) $V_{id}V^*_{is} = 0$, (b) $V_{is}V^*_{ib} = 0$ und (c) $V_{id}V^*_{ib} = 0$. Alle drei Dreiecke sind bezüglich einer gemeinsamen Skala dargestellt [Har 98].*

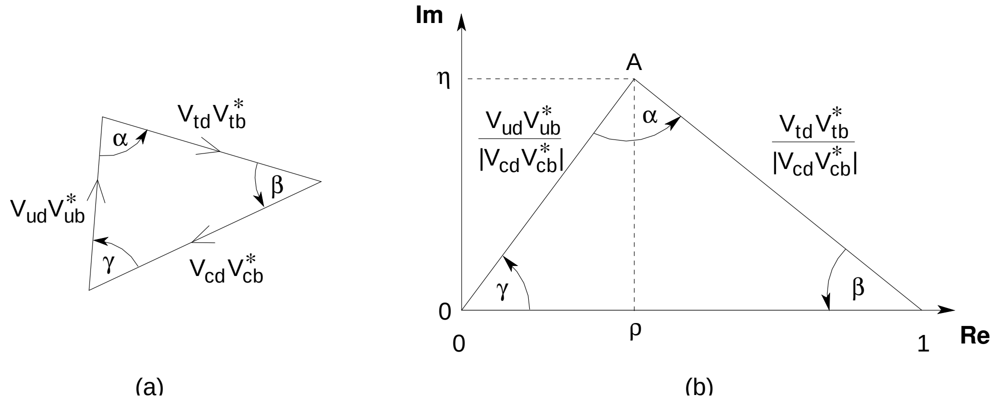


Abbildung 1.2: *Unitaritätsdreieck $V_{id}V_{ib}^*$: (a) unnormiert, (b) auf die Länge $V_{cd}V_{cd}^* = 1$ normierte Darstellung in der ρ-η-Ebene [Har 98].*

1.4.3 Status der Vermessung des Unitaritätsdreieckes

Die Bestimmung der Winkel des Unitaritätsdreieckes kann sowohl auf direktem Wege durch Messung der Winkel, als auch auf indirektem Wege durch Messungen erfolgen, welche die Bereiche des Scheitelpunktes einschränken. Abbildung 1.3 zeigt die auf indirektem Wege mit 68% Vertrauensgrad bestimmten bisherigen Kenntnisse über die Form des Unitaritätsdreiecks. Die experimentelle Bestimmung beruht auf den folgenden vier Größen:

1. Durch die Messung des Verhältnisses $|V_{ub}|/|V_{cb}|$ kann die Position des Scheitelpunktes auf einen Ring um (0,0) eingeschränkt werden.

2. Die Messung der Massendifferenz Δm_d zwischen den Masseneigenzuständen der neutralen B_d^o-Mesonen liefert einen Ring um (1,0) als erlaubten Bereich.

3. Die Messung des Parameters ϵ_k, der die Stärke der indirekten CP-Verletzung im Kaonsystem beschreibt, schränkt die Spitze des Dreiecks auf einen Bereich um eine Hyperbel ein.

4. Die Messung der Massendifferenz der B_s^o-Mesonen beschränkt die Spitze auf eine Halbkreisfläche mit dem Zentrum im Punkt (1,0).

Mit Hilfe dieser Messungen lassen sich für die Winkel des Unitaritätsdreiecks folgende Bereiche vorhersagen [Bar 00]:

$$\sin(2\alpha) = -0,11^{+0,20}_{-0,22} \qquad \sin(2\beta) = 0,725^{+0,044}_{-0,046} \qquad \gamma = (63,7^{+5,3}_{-7,0})^\circ \tag{1.29}$$

Verschiedene Experimente haben inzwischen den Winkel β direkt vermessen. Aktuelle Messungen der Experimente *BaBar* und *Belle* sagen folgende Werte für $\sin(2\beta)$ voraus:

$$\sin(2\beta) = 0,59 \pm 0,14(stat) \pm 0,05(syst) \qquad (BaBar) \quad \text{[Aub 01]} \tag{1.30}$$
$$\sin(2\beta) = 0,99 \pm 0,14(stat) \pm 0,06(syst) \qquad (Belle) \quad \text{[Abe 01]} \tag{1.31}$$

Die direkten Messungen sind somit in Übereinstimmung mit den indirekten Messungen und den theoretischen Vorhersagen des Standardmodells.

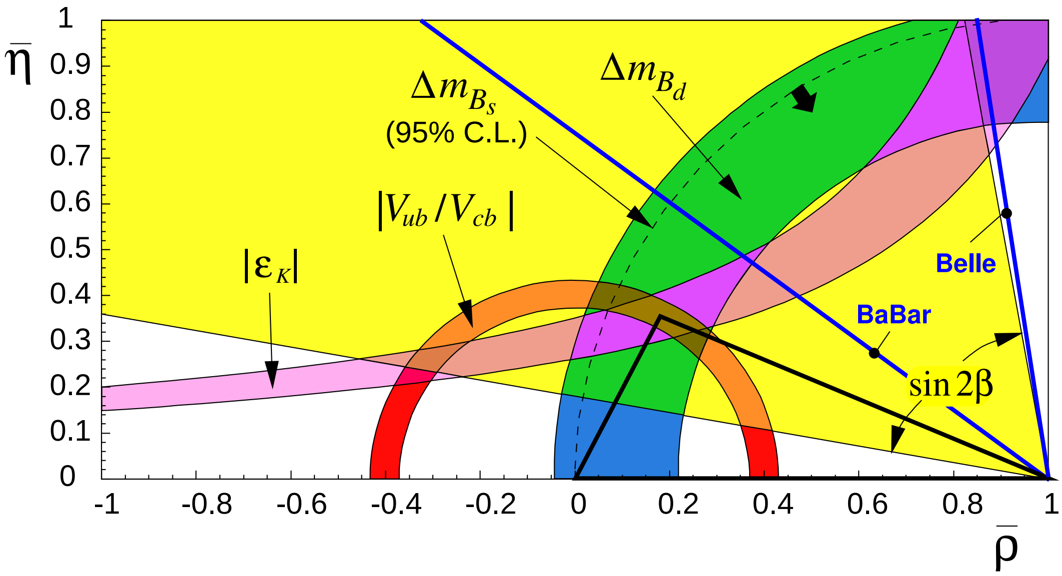


Abbildung 1.3: *Status der Vermessung des Unitaritätsdreieckes. Die Beschränkungen der Lage des Dreieckscheitelpunktes stammen aus den Messungen der Oszillationsfrequenz der B_d- und B_s-Mesonen, dem aus semileptonischen Zerfällen gewonnenen Verhältnis der CKM-Matrixelemente $|V_{ub}|/|V_{cb}|$, dem CP-Verletzungsparameter $|\epsilon_k|$ des Kaonsystems sowie aus den direkten Messungen des Winkels* $\sin(2\beta)$. *Die aktuellen Ergebnisse der Experimente BaBar und Belle sind mit ihren Mittelwerten in der Abbildung enthalten [Bar 00].*

1.5 CP-Verletzung in B-Meson Zerfällen

Das Auftreten von CP-Verletzung kann in drei Bereiche aufgeteilt werden [Har 98]:

1. *CP-Verletzung im Zerfall* tritt sowohl in geladenen als auch in neutralen Zerfällen auf, wenn die Amplituden für den Zerfall und für den CP-konjugierten Prozess unterschiedlich sind. Diese Art der CP-Verletzung wird auch als *direkte CP-Verletzung* bezeichnet.

2. *CP-Verletzung durch Mischung* tritt nur im Bereich neutraler Mesonen auf, wenn zwei neutrale Masseneigenzustände nicht als CP-Eigenzustände gewählt werden können. Diese Art der CP-Verletzung wird auch als *indirekte CP-Verletzung* bezeichnet.

3. *CP-Verletzung in der Interferenz zwischen Zerfällen mit und ohne Mischung* tritt ebenfalls nur in Zerfällen neutraler B-Mesonen in gemeinsame Endzustände für B^o und $\overline{B^o}$ auf.

Bevor auf die verschiedenen Arten der CP-Verletzung eingegangen wird, soll zunächst auf die Mischung neutraler B-Mesonen eingegangen werden, die für das Verständnis der CP-Verletzung wichtig ist.

1.5.1 Mischung neutraler B-Mesonen

Wie im System der K-Mesonen wird die Beschreibung der neutralen B-Mesonen dadurch erschwert, dass verschiedene neutrale Zustände für die Diskussion verschiedener physikalischer Prozesse notwendig sind: So existieren neben den zwei Flavoreigenzuständen

$B^o = \overline{b}d$ und $\overline{B^o} = b\overline{d}$, die als starke Eigenzustände einen definierten Quarkgehalt besitzen und sehr nützlich für die Beschreibung von Teilchenproduktionsprozessen sind, die Eigenzustände des schwachen Hamiltonian, also Zustände mit definierter Masse und Lebensdauer. Da CP keine Symmetrie der schwachen Wechselwirkung ist, sind die Masseneigenzustände keine CP-Eigenzustände.
Neutrale B-Mesonen, die in den Eigenzuständen der starken Wechselwirkung $|B^o\rangle$ und $|\overline{B^o}\rangle$ zum Zeitpunkt t_o erzeugt wurden, befinden sich nach der Zeit $t > t_o$ aufgrund der schwachen Wechselwirkung in einem quantenmechanischen Mischzustand

$$|B(t)\rangle \;=\; a(t)\;|B^o\rangle \;+\; b(t)\;|\overline{B^o}\rangle \tag{1.32}$$

dessen Zeitentwicklung durch die effektive zeitabhängige Schrödingergleichung

$$i\frac{d}{dt}\begin{pmatrix} a(t) \\ b(t) \end{pmatrix} = \mathbf{H}\begin{pmatrix} a(t) \\ b(t) \end{pmatrix} = \left(\mathbf{M} - \frac{i}{2}\mathbf{\Gamma}\right)\begin{pmatrix} a(t) \\ b(t) \end{pmatrix} \tag{1.33}$$

beschrieben wird [Nir 99]. $\mathbf{M}$ bezeichnet hierbei die hermitsche 2×2 Massenmatrix, $\mathbf{\Gamma}$ die hermitesche 2×2 Zerfallsmatrix. Die Zustandsmischung beruht auf schwachen Wechselwirkungsprozessen zweiter Ordnung (Abb. 1.4). Der effektive Hamiltonoperator $\mathbf{H}$ wird durch

$$\mathbf{H} = \begin{pmatrix} A & p^2 \\ q^2 & A \end{pmatrix} \qquad A, p, q \in \mathbf{C}\;, \tag{1.34}$$

parametrisiert. Er ist aufgrund der Zerfallsmatrix Γ nicht hermitsch. Seine Masseneigenzustände sind durch

$$|B_L\rangle \;=\; p\;|B^o\rangle \;+\; q\;|\overline{B^o}\rangle \qquad \text{Eigenwert} \quad \mu_L = A + pq \;=\; m_L - i\frac{\Gamma_L}{2}, \tag{1.35}$$

$$|B_H\rangle \;=\; p\;|B^o\rangle \;-\; q\;|\overline{B^o}\rangle \qquad \text{Eigenwert} \quad \mu_H = A - pq \;=\; m_H - i\frac{\Gamma_H}{2} \tag{1.36}$$

mit ihren entsprechenden Eigenwerten gegeben. $|B_L\rangle$ bezeichnet dabei den leichteren der beiden Massenzustände, $|B_H\rangle$ den schwereren. Die Zerfallsbreiten der beiden Zustände Γ_L und Γ_H sind aufgrund der großen Masse des B-Mesons und des dadurch bedingten großen Endzustandsphasenraumvolumen nahezu gleich: $\Gamma_L \approx \Gamma_H \approx \Gamma$.
Ein beliebiger physikalischer Zustand eines B-Mesons zur Zeit t ergibt sich aus der Linearkombination der beiden Masseneigenzustände zu

$$|B^o_{phys}\rangle = c_L e^{-i\mu_L t}\;|B_L\rangle \;+\; c_H e^{-i\mu_H t}\;|B_H\rangle \tag{1.37}$$

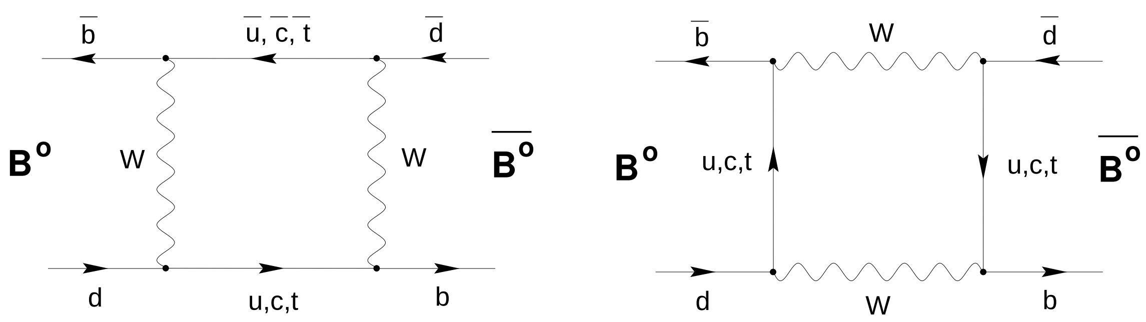


Abbildung 1.4: *Kastendiagramm der $B^o\overline{B^o}$-Mischung. Die Diagramme, die ein Top-Quark in ihrer Schleife enthalten, dominieren den Prozess aufgrund der großen Masse des Top-Quarks.*

mit den beiden durch die Anfangsbedingungen festgelegten Konstanten c_L und c_H. Durch Einsetzen der Masseneigenzustände (Gleichung 1.35 und 1.36) und der Randbedingung, dass zum Zeitpunkt $t = 0$ reine $|B^o\rangle$ bzw. $|\overline{B^o}\rangle$ vorliegen, erhält man für die zeitliche Entwicklung der beiden physikalischen Zustände

$$|B^o_{phys}(t)\rangle \;=\; e^{-\frac{\Gamma t}{2}}\, e^{-imt} \left[\cos\left(\frac{\Delta m}{2}t\right) |B^o\rangle \;+\; i\left(\frac{q}{p}\right)\, \sin\left(\frac{\Delta m}{2}t\right) |\overline{B^o}\rangle\right] \tag{1.38}$$

$$|\overline{B^o_{phys}}(t)\rangle \;=\; e^{-\frac{\Gamma t}{2}}\, e^{-imt} \left[\cos\left(\frac{\Delta m}{2}t\right) |\overline{B^o}\rangle \;+\; i\left(\frac{p}{q}\right)\, \sin\left(\frac{\Delta m}{2}t\right) |B^o\rangle\right] \tag{1.39}$$

Dabei bezeichnet $m = (m_H + m_L)/2$ die mittlere Masse und $\Delta m = m_H - m_L$ den Massenunterschied der beiden Masseneigenzustände.

1.5.2 Direkte CP-Verletzung

Eine Möglichkeit CP-Verletzungen zu messen, ist die Suche nach unterschiedlichen Zerfallsbreiten eines Prozesses und seines CP-konjugierten Spiegelprozesses, z. B. $B^\pm \;\to\; \pi^\pm K^o$. Seien

$$A = \langle f|\mathcal{H}|B^o\rangle \qquad \text{und} \qquad \overline{A} = \langle \overline{f}|\mathcal{H}|\overline{B^o}\rangle \tag{1.40}$$

die Amplituden des Zerfalls und des CP-konjugierten Zerfalls. Nach dem Standardmodell unterscheiden sich die Amplituden A und $\overline{A}$ nur durch das Vorzeichen der beteiligten schwachen Phasen δ – die beteiligten starken Phasen α bleiben aufgrund der CP-Erhaltung in der starken Wechselwirkung bei der CP-Transformation erhalten. Tragen mehrere Diagramme zu den Zerfällen bei, so ergeben sich die Amplituden zu

$$A \;=\; \sum_k A_k \;=\; \sum_k M_k e^{i(\alpha_k+\delta_k)} \tag{1.41}$$

$$\text{und} \qquad \overline{A} \;=\; \sum_k \overline{A_k} \;=\; \sum_k M_k e^{i(\alpha_k-\delta_k)} \tag{1.42}$$

Sind die Amplituden unterschiedlich groß, d. h. ist

$$\left|\frac{\overline{A}}{A}\right| \;=\; \left|\frac{\sum_k M_k e^{i(\alpha_k-\delta_k)}}{\sum_k M_k e^{i(\alpha_k+\delta_k)}}\right| \neq 1 \;, \tag{1.43}$$

so tritt CP-Verletzung auf – sind die schwachen Phasen alle gleich, so ist CP erhalten. CP-Verletzung tritt nur auf, wenn mindestens zwei Amplituden, die eine Differenz in der starken und schwachen Phase besitzen, beteiligt sind. Für den Fall zweier beitragender Amplituden ist die Zerfallsbreite $\Gamma(B \to f)$ proportional zu $|A_1 + A_2|^2$, die Zerfallsbreite $\Gamma(\overline{B} \to \overline{f})$ proportional zu $|\overline{A_1} + \overline{A_2}|^2$, und die Differenz der beiden Zerfallsbreiten

$$|A|^2 - |\overline{A}|^2 \;\propto\; M_1\, M_2\, \sin\delta_w\, \sin\alpha_s \tag{1.44}$$

mit den Phasendifferenzen $\delta_w = \delta_1 - \delta_2$ der schwachen Phase und $\alpha_s = \alpha_1 - \alpha_2$ der starken Phase.

Durch Messung der beiden Zerfallsbreiten $\Gamma(B \to f)$ und $\Gamma(\overline{B} \to \overline{f})$ lässt sich CP-Verletzung im B-System nachweisen. Die CP-Verletzung tritt hierbei direkt auf, ohne dass Zustandsmischungen wie im Kaon-System eine Rolle spielen. Da die starke Phase und die beiden Beträge M_1 und M_2 in den meisten Fällen unbekannt sind, lässt sich die schwache Phase jedoch nur schwer extrahieren. Von daher sind Größen, die nur von der schwachen Phase abhängen, wesentlich exakter zu bestimmen.

1.5.3 Indirekte CP-Verletzung

Für die beiden Parameter p und q aus Gleichung 1.35 und 1.36 bedeutet das Verhältnis

$$\left|\frac{p}{q}\right| = 1 \ , \tag{1.45}$$

dass die Wahrscheinlichkeit, dass ein B^o-Meson in ein $\overline{B^o}$ oszilliert gleichgroß ist, wie die umgekehrte Oszillation eines $\overline{B^o}$ in ein B^o und damit, dass CP erhalten ist. Indirekte CP-Verletzung tritt auf, wenn das Verhältnis $|q/p| \neq 1$ ist und damit die Masseneigenzustände nicht den CP-Eigenzuständen entsprechen.
Für die beiden neutralen Mesonen B^o und $\overline{B^o}$ ist, wie oben erwähnt, die Differenz ihrer Lebensdauer praktisch vernachlässigbar ($\Delta\Gamma_{B^o}/\Gamma_{B^o} = \mathcal{O}(10^{-2})$). Auf der anderen Seite wurde die Massendifferenz Δm_{B^o} mit $\Delta m_{B^o}/\Gamma_{B^o} = 0{,}73\pm0{,}05$ gemessen [Cas 00] und damit $\Delta_{B^o} \ll \Delta m_{B^o}$.
Für B^o-Mesonen ergibt sich unter Verwendung der obigen Näherung für das Verhältnis

$$\left|\frac{q}{p}\right| = \sqrt{\left|\frac{M_{12}^* - i\Gamma_{12}^*/2}{M_{12} - i\Gamma_{12}/2}\right|} \simeq \sqrt{\left|\frac{M_{12}^*}{M_{12}}\right|} \approx 1 \tag{1.46}$$

d. h. die zu erwartende CP-Verletzung ist sehr klein. Daher kann q/p als ein reiner komplexer Phasenfaktor

$$\frac{p}{q} = e^{-2i\phi_m} \tag{1.47}$$

mit der *Mischungsphase* ϕ_m geschrieben werden. ϕ_m ist die Quelle der CP-Verletzung.

1.5.4 CP-Verletzung durch Interferenz von Zerfällen mit und ohne Oszillation

Betrachtet man den Zerfall von neutralen B-Mesonen in einen CP-Eigenzustand, so kann dieser sowohl von einem B^o- als auch von einem $\overline{B^o}$-Meson-Ausgangszustand erreicht werden. Durch die Interferenz der beiden möglichen Zerfallswege ist CP-Verletzung möglich: Ein B^o kann z. B. direkt in den Endzustand f übergehen oder via einer Umwandlung in ein $\overline{B^o}$ zuvor:

$$\mathrm{B^0} \longrightarrow \mathrm{f}, \qquad \mathrm{B^0} \longrightarrow \overline{\mathrm{B^0}} \longrightarrow \mathrm{f}$$

Die Gesamtamplituden der Zerfälle der beiden physikalischen Zustände B^0_{phys} und $\overline{B^0_{phys}}$ ergeben sich unter Verwendung von Gleichung 1.35 und 1.36 zu:

$$\begin{aligned}
\langle f|\mathcal{H}|B^0_{phys}(t)\rangle &= e^{\frac{-\Gamma t}{2}} e^{-imt}\left[\cos\left(\frac{\Delta m}{2}t\right)\langle f|\mathcal{H}|B^0\rangle + i\left(\frac{p}{q}\right)\sin\left(\frac{\Delta m}{2}t\right)\langle f|\mathcal{H}|\overline{B^o}\rangle\right]\\
\langle f|\mathcal{H}|\overline{B^0_{phys}}(t)\rangle &= e^{\frac{-\Gamma t}{2}} e^{-imt}\left[\cos\left(\frac{\Delta m}{2}t\right)\langle f|\mathcal{H}|\overline{B^0}\rangle + i\left(\frac{p}{q}\right)\sin\left(\frac{\Delta m}{2}t\right)\langle f|\mathcal{H}|B^o\rangle\right]
\end{aligned} \tag{1.48}$$

und die Zerfallsraten zu

$$\Gamma_f(t) = \left|\langle f|\mathcal{H}|B^0_{phys}(t)\rangle\right|^2 \qquad \text{und} \qquad \overline{\Gamma}_f(t) = \left|\langle f|\mathcal{H}|\overline{B^0_{phys}}(t)\rangle\right|^2 \tag{1.49}$$

Die Amplituden der Zerfälle des B^o und des $\overline{B^o}$ ergeben sich analog Gleichung 1.42 mittels der schwachen Phasen δ und der starken Phasen α zu:

$$\langle f|\mathcal{H}|B^o\rangle = |A_1|e^{i(\alpha_1+\delta_1)} \qquad \text{und} \qquad \langle f|\mathcal{H}|\overline{B^o}\rangle = |A_2|e^{i(\alpha_2-\delta_2)} \tag{1.50}$$

sowie für die CP-konjugierten Übergänge

$$\langle \overline{f}|\mathcal{H}|\overline{B^o}\rangle = |A_1|e^{i(\alpha_1-\delta_1)} \qquad \text{und} \qquad \langle \overline{f}|\mathcal{H}|B^o\rangle = |A_2|e^{i(\alpha_2+\delta_2)} \tag{1.51}$$

Da wir hier nur den Fall betrachten, dass der Endzustand ein CP-Eigenzustand ist, d. h. dass

$$CP|f\rangle = |\overline{f}\rangle = \eta_f|f\rangle \qquad \text{mit} \qquad \eta_f \in \{-1;1\} \tag{1.52}$$

gilt, benötigt man für die beiden Matrixelemente $\langle f|\mathcal{H}|B^o\rangle$ und $\langle f|\mathcal{H}|\overline{B^o}\rangle$ nur eine gemeinsame Phase:

$$\langle f|\mathcal{H}|B^o\rangle = \langle f|\mathcal{H}|\overline{B^o}\rangle = \eta_f A e^{i\alpha-\delta} \tag{1.53}$$

Verwendet man die in Abschnitt 1.5.3 ermittelte Näherung von $|p/q| = 1$ (Gleichung 1.46), so erhält man zusammen mit den Gleichungen 1.48 für die Zerfallsraten

$$\begin{aligned} \Gamma_f(t) &= e^{-\Gamma t}\, A^2\, [1 + \eta_f \sin(\Delta m t)\sin(\varphi_w)] \;, \\ \text{und} \qquad \overline{\Gamma}_f(t) &= e^{-\Gamma t}\, A^2\, [1 - \eta_f \sin(\Delta m t)\sin(\varphi_w)] \;. \end{aligned} \tag{1.54}$$

mit der relativen schwachen Phase

$$\varphi_w = 2\;(\phi_m \;+\; \delta)\;. \tag{1.55}$$

Durch Messung der zeitabhängigen Asymmetrie

$$\mathcal{A}_{CP} = \frac{\Gamma_f(t) - \overline{\Gamma_f}(t)}{\Gamma_f(t) + \overline{\Gamma_f}(t)} = \eta_f \cdot \sin(\Delta m) \cdot \sin(\varphi_w) \tag{1.56}$$

der beiden Zerfallsraten lässt sich die relative Phase φ_w bestimmen. Man beachte, dass die beiden Zerfallsraten und damit die Asymmetrie unabhängig von einer starken Phase sind und ihre Messung deshalb unabhängig von hadronischen Unsicherheiten ist.
Der Zerfallskanal, dem zur Zeit am meisten Aufmerksamkeit geschenkt wird, und der auch der Messung der CP-Verletzung bei HERA-B zugrunde liegt, ist der so genannte *goldene Zerfall* $B^o \to J/\psi K^o_s \to J/\psi\pi^+\pi^-$.

1.6 Messung der CP-Verletzung bei HERA-B

1.6.1 Der goldene Zerfall $B^o \to J/\psi K^o_s \to J/\psi\pi^+\pi^-$

Der goldene Zerfall $B^o \to J/\psi K^o_s \to J/\psi\pi^+\pi^-$ trägt seinen Namen aufgrund der Tatsache, dass die theoretischen Unsicherheiten bei der Extraktion der schwachen Phase φ_w sehr gering sind und er sich sehr gut experimentell durch den Nachweis des J/ψ-Mesons über seinen Zerfall in zwei Leptonen $\mu^+\mu^-$ bzw. e^+e^- und den Zerfall des Kaons in $\pi^+\pi^-$ nachweisen läßt. Abbildung 1.5 zeigt das Feynman-Diagramm des Zerfalls, Abbildung 1.6 das Zerfallsschema.

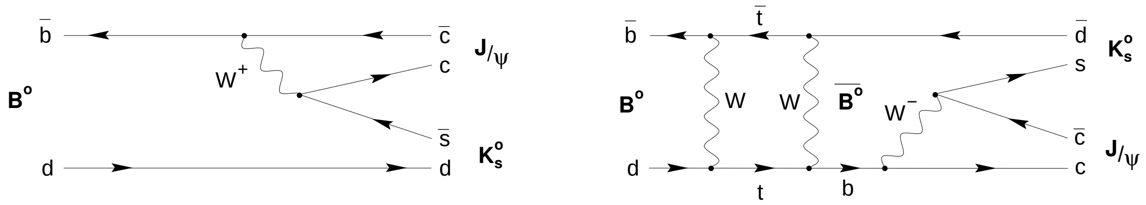


Abbildung 1.5: *Feynman-Graph des goldenen Zerfalls $B^o \to J/\psi K_s^o$ in erster Ordnung.*

Bei dem Endzustand $J/\psi\ \pi^+\pi^-$ des goldenen Kanal handelt es sich um einen CP-Eigenzustand mit dem Eigenwert $\eta = -1$. Damit setzt sich die schwache Phase φ_w aus der schwachen Phase $\phi_{M,B}$ der Mischung der beiden B-Mesonen,der schwachen Phase $\phi_{M,K}$ der Mischung der beiden Kaonen, sowie der schwachen Phase des Baumdiagramms (Abbildung 1.5) anhand von Gleichung 1.55 zusammen:

$$\varphi_w = 2(\phi_{M,B}\ +\ \delta\ +\ \phi_{M,K})\ . \tag{1.57}$$

Die Phasen ergeben sich aus [Har 98]:

$$e^{-2i\phi_{M,B_d}} \equiv \left(\frac{p}{q}\right)_{B_d} = \frac{V_{tb}^* V_{td}}{V_{tb} V_{td}^*} \tag{1.58}$$

$$\eta_{\psi K} \cdot e^{-2i\delta} \equiv \frac{\langle J/\psi K_S^0|\mathcal{H}|\overline{B^0}\rangle}{\langle J/\psi K_S^0|\mathcal{H}|B^0\rangle} = \frac{V_{cs}^* V_{cb}}{V_{cs} V_{cb}^*} \tag{1.59}$$

$$e^{-2i\phi_{M,K}} \equiv \left(\frac{p}{q}\right)_{K^o} = \frac{V_{cd}^* V_{cs}}{V_{cd} V_{cs}^*} \tag{1.60}$$

Durch Einsetzen der Gleichungen 1.58 bis 1.60 in Gleichung 1.57 ergibt sich die schwache Phase zu

$$\varphi_w = 2 \cdot arg\left(-\frac{V_{cd} V_{cb}^*}{V_{td} V_{tb}^*}\right)\ =\ 2\beta \tag{1.61}$$

mit dem Winkel β des Unitaritätsdreieckes (Abbildung 1.2). Mit Gleichung 1.56 ergibt sich damit die Asymmetrie der Zerfallsraten des goldenen Zerfalls zu:

$$\mathcal{A}_{CP} = -\sin(\Delta_m t)\ \sin(2\beta)\ . \tag{1.62}$$

1.6.2 Messung der zeitintegrierten Asymmetrie

Statt einer Messung der zeitabhäbgigen Raten (Gleichung 1.49) kann auch eine Messung der zeitintegrierten Raten erfolgen, bei der die Zahl der insgesamt gemessenen B^o- und $\overline{B^o}$-Zerfälle gezählt werden:

$$N_\tau = \int_\tau^\infty \Gamma(t)dt \qquad \text{und} \qquad \overline{N_\tau} = \int_\tau^\infty \overline{\Gamma(t)}dt \tag{1.63}$$

Die Integration beginnt hierbei erst zu einem Zeitpunkt $\tau > t_o = 0$ und nicht bereits zum Zeitpunkt der Teilchenerzeugung t_o, um die B-Mesonen mit ihrer im Vergleich zu

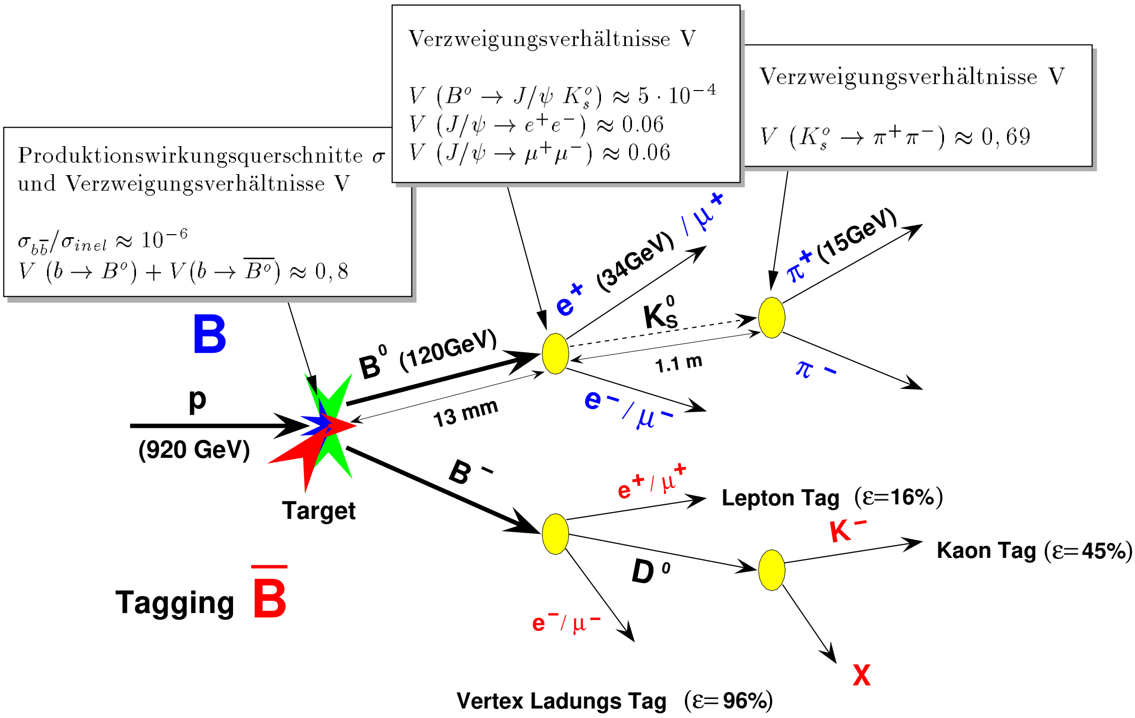


Abbildung 1.6: *Zerfallsschema des goldenen Zerfalls. Dargestellt ist die Zerfallskette zusammen mit den Verzweigungsverhältnissen und den Wirkungsquerschnitten. Der für den Trigger relevante Zweig ist in der oberen Hälfte als Zerfall eines B-Mesons dargestellt – die untere Hälfte stellt den Identifikationszweig (auch „Tagging "genannt) dar, zur Identifizierung, ob es sich bei dem getriggerten Zerfall um ein B^o- oder $\overline{B^o}$-Meson gehandelt hat.*

anderen Teilchen relativ hohen Lebensdauer sauber vom Untergrund zu separieren. Die zeitintegrierte Asymmetrie $\mathcal{A}^{int}_{CP}$ ergibt sich daraus zu

$$\mathcal{A}^{int}_{CP} = \frac{N_\tau - \overline{N_\tau}}{N_\tau + \overline{N_\tau}} = \frac{\sin(x\tilde{\tau}) + x\cos(x\tilde{\tau})}{1 + x^2} \cdot \sin(2\beta) \tag{1.64}$$

mit der auf die B^o-Lebensdauer normierten Zeit $\tilde{\tau} = \tau/\tau_B$ und dem Mischungsparameter $x = \Delta m/\Gamma$, der sich aus der Lebensdauer Γ und der Massendifferenz Δm des $B^o\overline{B^o}$-Systems ergibt. Der experimentell gemessene Wert von x beträgt $x = 0,73 \pm 0,05$ [Amm 98, Cas 00].

1.6.3 Bestimmung des B-Flavors

Da der Endzustand des goldenen Zerfalls sowohl vom B^o- als auch vom $\overline{B^o}$-Meson erreicht werden kann, muss zur Bestimmung der Asymmetrien neben der Messung des goldenen Zerfalls auch nachgewiesen werden, ob es sich um den Zerfall eines B^o oder $\overline{B^o}$ gehandelt hat.
Bei der Produktion von b-Quarks durch die starke Wechselwirkung wird immer ein $b\bar{b}$-Quarkpaar erzeugt. Daher kann das zweite B-Meson, das ein b-Quark mit entgegengesetzten Flavor enthält, zur Bestimmung des b-Flavors des B-Mesons des goldenen Zerfalls verwendet werden. Die Bestimmung des Flavors wird auch als *Tagging*[4] bezeichnet.

[4]engl. für Markieren

Man unterscheidet zwei Arten von Markierungen: Unter *exklusiven Markierungen* versteht man den Nachweis des gesamten Zerfallszweiges des zweiten B-Mesons wohingegen *inklusive Markierungen* nur einen Teil der Informationen verwenden. Exklusive Markierungen sind sehr sicher, haben jedoch den Nachteil, dass man sie nur bei Ereignissen verwenden kann, in denen die komplette Zerfallskette nachgewiesen wurde. Bei HERA-B müssen stattdessen unter anderem folgende inklusive Markierungen verwendet werden [Loh 97]:

- *Lepton-Markierung*: Zerfällt das b-Meson des Markierungskanals semileptonisch (z. B. $b \to c + W^- \to c + l^- + \overline{\nu}$), so kann über die Ladung des Leptons, welches im Mittel einen sehr großen Transversalimpuls besitzt, auf die Ladung des b-Quarks geschlossen werden: ein e^- weist auf ein b-Quark hin, ein e^+ auf ein $\overline{b}$-Quark.

  Zerfällt das c-Quark aus diesem Zerfall ebenfalls semileptonisch via $c \to s + e^+ + \nu_e$, so kann das Positron fälschlicherweise als vom b-Quark kommend identifiziert werden und zu einer falschen Markierung führen. Diese Leptonen besitzen allerdings im Durchschnitt einen deutlich kleineren Transversalimpuls.

- *Kaon-Markierung*: Zerfällt das b-Quark über die dominante Zerfallskette $b \to c \to s$, so kann mittels der Identifizierung des geladenen Kaons auf die Ladung des b-Quarks geschlossen werden: Ein $K^-(u\overline{s})$ weist auf ein b-Quark, ein $K^+(\overline{u}s)$ auf ein $\overline{b}$-Quark hin.

- *Ladungs-Vertex-Markierung*: Bei geladenen B-Hadronen kann durch eine Rekonstruktion des Zerfallsvertex des B-Mesons und einer Summation der Ladungen aller an diesem Vertex beteiligten Teilchenspuren eine Aussage über die Ladung und damit über den Flavor des B-Hadron gemacht werden.

Da keine der Markierungen perfekt ist, sondern es immer zu Fehlmarkierungen kommen kann, werden der so genannte *Abschwächungsfaktor* D und die Markierungseffizienz ϵ_{tag} eingeführt:

$$D = \frac{N_r - N_f}{N_r + N_f} \qquad \text{und} \qquad \epsilon_{tag} = \frac{N_r}{N^{rec}_{B^o}} \ . \tag{1.65}$$

N_r bezeichnet die Anzahl der richtig, N_f die Anzahl der falsch bestimmten B-Flavor der insgesamt gemessenen $N^{rec}_{B^o}$ goldenen Zerfälle. Die zeitintegrierte Asymmetrie $\mathcal{A}^{int}_{CP}$ wird durch den Abschwächungsfaktor D verringert, sodass sich die beobachte CP-Asymmetrie $\mathcal{A}^{beob}_{CP}$ zu

$$\mathcal{A}^{beob}_{CP} = D \cdot \frac{\sin(x\tilde{\tau}) + x\cos(x\tilde{\tau})}{1 + x^2} \cdot \sin(2\beta) \tag{1.66}$$

ergibt. Damit beträgt der Fehler der Messung des Winkels β

$$\Delta \sin(2\beta) = \frac{1 + x^2}{\sin(x\tilde{\tau}) + x\cos(x\tilde{\tau})} \cdot \frac{1}{D\sqrt{\epsilon_{tag}}\sqrt{N^{rec}_{B^o}}} \ . \tag{1.67}$$

Monte-Carlo-Studien [Loh 94] sagen einen kombinierten Wert der drei diskutierten Markierungsmethoden von $D\sqrt{\epsilon_{tag}} = 0{,}31 \pm 0{,}03$ voraus. Mit einem Mischungsparameter x von $x = 0{,}723 \pm\ 0{,}032$ [Cas 00] und einer Mindestlebensdauer von $\tilde{\tau}$ =0,7 benötigt man für die Messung des Winkels β mit einer Genauigkeit von $\delta \sin(2\beta) \leq 0{,}1$ den Nachweis von etwa 2000 goldenen Zerfällen.

1.6.4 Die Produktion von B- und J/ψ-Mesonen

Bei HERA-B werden die B-Mesonen und die direkten J/ψ-Mesonen bei der Kollision des HERA-Protonenstrahls mit den Nukleonen eines der Drahttargets erzeugt. Durchquert eines der Strahlprotonen einen Targetdraht, so kann es durch Gluon-Gluon-Fusion und Quark-Antiquark-Vernichtung zu einem inelastischen Streuprozess zwischen dem Proton p und einem der Nukleonen N des Targetdrahtes kommen, bei denen ein schweres Quark-Antiquark-Paar $Q\overline{Q}$ erzeugt wird (Abbildung 1.7):

$$p + N \rightarrow Q\overline{Q} + X \ . \tag{1.68}$$

Die Schwerpunktsenergie der Wechselwirkung beträgt 41,6 GeV.

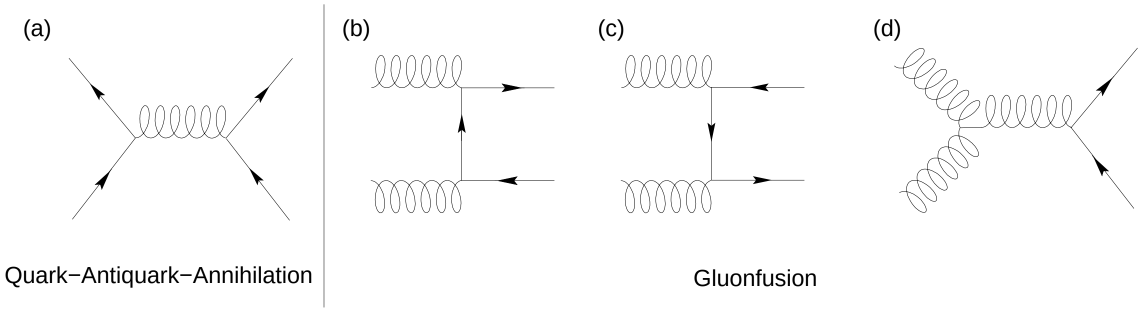


Abbildung 1.7: *Feynmandiagramme, die in führender Ordnung die Produktion von schweren Quarks beschreiben: (a) Produktion durch Quark-Antiquark-Vernichtung (b)-(d) Produktion durch Gluonfusion.*

Der Wirkungsquerschnitt für die Erzeugung eines $c\overline{c}$-Quarkpaares durch den Prozess (1.68) beträgt etwa 70 μb, der Wirkungsquerschnitt der Erzeugung eines $b\overline{b}$-Quarkpaares durch den Prozess (1.68) ist nicht genau bekannt. Sowohl die experimentellen Messwerte, als auch die theoretischen Vorhersagen weisen große Unsicherheiten auf. Die Berechnung des Wirkungsquerschnitts in der Störungsrechnung ist aufgrund der langsamen Konvergenz der Reihenentwicklung der starken Kopplungskonstante α_s (die bei der Skala $Q^2 = \mathcal{O}(m_{Q^2})$ relativ groß ist) sehr schwierig: Der Wirkungsquerschnitt wird hauptsächlich durch Gluonfusionsprozesse in niedrigster Ordnung dominiert, Quarkvernichtungsprozesse tragen nur zu etwa 15% bei. Die bis zur dritten Ordnung in α_s durchgeführten Berechnungen sagen Werte zwischen 6 und 150 nb voraus. Die gemessenen Werte der $b\overline{b}$-Wechselwirkung im Energiebereich von HERA-B stammen von den beiden Fixed-Target Experimenten E789 und E771 am Fermilab und wurden mit 800 GeV Protonen in einem beschränkten Phasenraum bestimmt und dann über die kinematischen Variablen integriert. Die gemessen $b\overline{b}$-Wirkungsquerschnitte betragen

$$\sigma_{b\overline{b}} = (5,7 \pm 2,0)\,\text{nb} \qquad \text{(E789} \quad \text{[Jan 95])} \tag{1.69}$$

$$\text{und} \quad \sigma_{b\overline{b}} = 43^{+28}_{-18}\,\text{nb} \qquad \text{(E771} \quad \text{[Ale 99])} \tag{1.70}$$

Die großen Fehler kommen von der begrenzten Anzahl an Ereignissen und modelabhängigen Annahmen bei der Extrapolation auf den totalen Wirkungsquerschnitt. Abbildung 1.8 zeigt die theoretischen Erwartungswerte zusammen mit den experimentellen Werten der $c\overline{c}$- und $b\overline{b}$-Wirkungsquerschnitte.

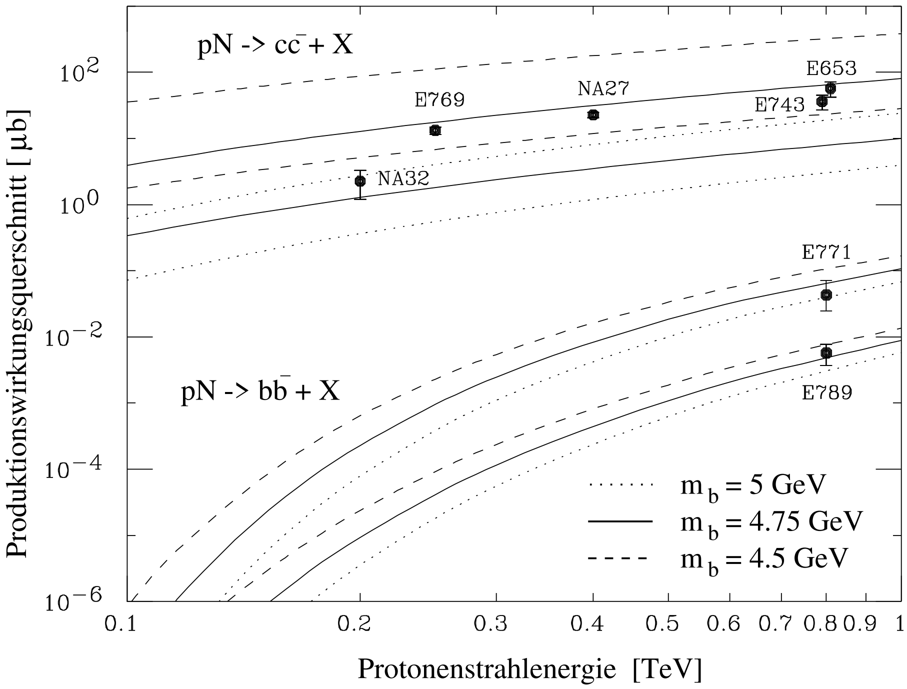


Abbildung 1.8: *Theoretische Erwartungen und experimentelle Werte der $c\bar{c}$- und $b\bar{b}$-Produktion in Proton-Nukleonstößen [Fri 97].*

Für den Entwurf von HERA-B wurde von einem Wirkungsquerschnitt von $\sigma_{b\bar{b}} = 12$ nb bei der damaligen Protonenstrahlenergie von 820 GeV ausgegangen. Aufgrund der Erhöhung der Protonenenergie sollte der Wert von $\sigma_{b\bar{b}}$ sich um etwa 40 bis 50% erhöhen, aber auch bei dieser Energie ist der genaue Wert unbekannt.
Für den Produktionswirkungsquerschnitt von $c\bar{c}$-Quarks existieren mehr Messungen (Abbildung 1.8), für HERA-B wird von einem Wirkungsquerschnitt von ungefähr $\sigma_{c\bar{c}} = 70\ \mu$b ausgegangen.

1.6.5 Experimenteller Nachweis

Ein ursprüngliches Ziel der Messungen bei HERA-B war es, den Winkel $\sin 2\beta$ mit einer Genauigkeit von besser als 0,1 zu messen. Ereignisse mit einem goldenen Zerfalls stellen im Vergleich zu den inelastischen Untergrundereignissen jedoch nur einen sehr kleinen Teil der Ereignisse dar. Der Anteil hängt neben dem Produktionswirkungsquerschnitt von der Fragmentierungswahrscheinlichkeit des $b\bar{b}$-Quarkpaares in ein B^o bzw. $\overline{B^o}$ und den relativen Verzweigungsverhältnissen des goldenen Zerfalls ab (vgl. Abbildung 1.6).
Wie in der Einleitung erwähnt, verwendet man zur Selektion der physikalisch interessanten Ereignisse ein vierstufiges Trigger System, das auf die Selektion physikalisch interessanter Ereignisse spezialisiert ist. Die Effizienz des Trigger Systems stellt daher zusammen mit der erreichbaren Reduktion der Ereignisrate einen der wesentlichen Faktoren bei dem Nachweis der Ereignisse und dem Erreichen der physikalischen Ziele dar.
Berücksichtigt man den Produktionsquerschnitt, alle Verzweigungsverhältnisse und alle Effizienzen, so bestimmt sich das Verhältnis von Ereignissen mit einem goldenen Zerfall zu Untergrundereignissen zu etwa $3 \cdot 10^{-12}$ aller Proton-Nukleon-Wechselwirkungen. Wie in Abschnitt 1.6.3 gezeigt, benötigt man etwa 2000 nachgewiesene goldene Zerfälle für

B^o Produktion	
Wirkungsquerschnitt $\sigma_{b\bar{b}}$	12 nb
Wirkungsquerschnitt σ_{inel}	13 mb
$\sigma_{b\bar{b}}/\sigma_{inel}$	$9,2 \cdot 10^{-7}$
Wahrscheinl. dass eines der b-Quarks zu B^o oder $\overline{B^o}$ fragmentiert	$\approx 0,8$
Erzeugte B^o / $\overline{B^o}$-Mesonen pro Jahr	$\approx\ 3 \cdot 10^8$

B^o Zerfall	
rel. Verzweigungsverh. $B^0 \to J/\psi K_s^o$	$5 \cdot 10^{-4}$
rel. Verzweigungsverh. $J/\psi \to \mu^+\mu^-/e^+e^-$	0,12
rel. Verzweigungsverh. $K_s^o \to \pi^+\pi^-$	0,69
Erzeugte goldene Zerfälle pro Jahr	$\approx$ 12000

Nachweis-Effizienzen	
Effizienz (Detektor, Trigger, Rekonstruktion)	0,15
Tagging-Effizienz (Lepton, Kaon, Ladung)	0,69
Nachgewiesene goldene Zerfälle pro Jahr	$\approx$ 1200

Tabelle 1.2: *Erzeugungs- und Zerfallsrate des goldenen Zerfalls zusammen mit den ursprünglich geplanten Nachweiseffizienzen. Für die Berechnung der Zerfälle pro Jahr wurde eine Messzeit von 10^7 s und eine Wechselwirkungsrate von 40 MHz zugrunde gelegt [Loh 94, Cas 00].*

einen Fehler von 0,1 in $\sin(2\beta)$. Bei einer Wechselwirkungsrate von 40 MHz benötigt man zwei Jahre, um diese 2000 Zerfälle zu rekonstruieren.
Tabelle 1.2 fasst die Produktionsquerschnitte, Verzweigungsverhältnisse und geplanten Effizienzen für den goldenen Zerfall bei HERA-B zusammen.

Nachweis direkt produzierter J/ψ-Mesonen

Neben der Messung des goldenen Zerfalls können mit Hilfe des Trigger Systems auch direkt produzierte J/ψ-Mesonen nachgewiesen werden, die zur Untersuchung weiterer physikalischer Ziele, wie sie in den nächsten Abschnitten diskutiert werden, verwendet werden können. Die Anzahl $N_{J/\psi}$, der mit der ersten Triggerstufe FLT[5] gemessenen direkten $J/\psi \to l^+l^-$-Ereignisse, ergibt sich ähnlich dem Nachweis des goldenen Zerfalls aus der Wechselwirkungsrate IR, dem Verhältnis zwischen dem Wirkungsquerschnitt $\sigma_{J/\psi}$ für die direkte J/ψ-Produktion und dem inelastischen Wirkungsquerschnitt σ_{inel}, dem Verzweigungsverhältnis $BR_{J/\psi\to l^+l^-}$ des Zerfalls $J/\psi \to l^+l^-$, der Triggereffizienz ϵ_{FLT} des FLTs und der Rekonstruktionseffizienz ϵ_{RECO} sowie der gemessen Zeit T zu

$$N_{J/\psi} = IR \cdot \frac{\sigma_{J/\psi}}{\sigma_{inel}} \cdot BR_{J/\psi\to l^+l^-} \cdot \epsilon_{FLT} \cdot \epsilon_{RECO} \cdot T\ . \tag{1.71}$$

Auch hier spielt wiederum die Triggereffizienz eine entscheidende Rolle für die Anzahl der nachgewiesenen physikalischen Ereignisse. Tabelle 1.3 fasst die erwarteten J/ψ-Raten für einen voll ausgestatteten Detektor mit den erwarteten Effizienzen zusammen.

[5] *First Level Trigger* — engl. für Erste Auslösestufe

[6] Diese Effizienz beinhaltet die geometrische Effizienz und einen Schnitt von $KTRIG \geq 500$ auf den KTRIG-Wert der Cluster im Kalorimeter.

Direkte J/ψ Produktion		
Wirkungsquerschnitt $\sigma_{J/\psi}$	400 nb / Nukleon	
Wirkungsquerschnitt σ_{inel}	13 mb / Nukleon	
$\sigma_{J/\psi}/\sigma_{inel}$	$3,08 \cdot 10^{-5}$	
Produzierte J/ψ-Mesonen pro Stunde	5,54 $\cdot 10^5$	
$J/\psi \to l^+l^-$ Zerfall		
	e^+e^-	$\mu^+\mu^-$
rel. Verzweigungsverhältnis $J/\psi \to l^+l^-$	$\approx$ 0,059	$\approx$ 0,059
Erzeugte $J/\psi \to l^+l^-$-Rate pro Stunde	$\approx$ 30000	$\approx$ 30000
Detektor- und Triggerakzeptanz & -effizienz		
	e^+e^-	$\mu^+\mu^-$
geometrische Akzeptanz	0,34 [6]	0,62
Pretrigger & FLT Effizienz	0,50 - 0,85	0,20 - 0,52
FLT Gesamt-J/ψ-Effizienz	0,075 - 0,29	0,12 - 0,32
FLT getriggerte J/ψ-Rate pro Stunde	5700 - 10000	4000 - 10600
Rekonstruktionseffizienz	0,53	0,61
Rekonstruierte J/ψ-Rate pro Stunde	3000 - 5000	2500 - 6400

Tabelle 1.3: *Erwartete J/ψ-Effizienz für die Datennahme 2002 unter der Annahme einer 5 MHz-Datennahme [HER 00a].*

1.7 Weitere physikalische Ziele von HERA-B

Das Detektor und Trigger System wurden anhand der Anforderungen der Messung der CP-Verletzung, wie sie in den letzten Abschnitten diskutiert wurden, entwickelt. Aufgrund von unvorhergesehenen technischen Schwierigkeiten bei dem Bau und der Inbetriebnahme des Detektor und Trigger Systems kam es jedoch zu Verzögerungen bei der Fertigstellung des Detektors. Das physikalische Programm des Experimentes HERA-B wurde deshalb modifiziert, wobei das neue physikalische Programm durch die Fähigkeiten des Detektor und Trigger Systems bestimmt wird. In diesem Abschnitt sollen die wichtigsten Aspekte dieses Programms diskutiert werden [HER 00a]:

Messung des $b\bar{b}$-Produktions-Wirkungsquerschnitts

Verschiedene Messungen zur Bestimmung des $b\bar{b}$-Wirkungsquerschnitts wurden, wie bereits erwähnt, an Fixed-Target-Experimenten durchgeführt [Kap 94, Ale 99], die Ergebnisse weisen jedoch große Fehler auf und sind zudem untereinander auf dem Niveau von 2,5 σ inkonsistent. Das Experiment HERA-B kann in diesem Bereich wichtige neue Erkenntnisse liefern, da es in der Lage ist, den Wirkungsquerschnitt in verschiedenen Kanälen und mit verschiedenen Techniken zu messen.
Zur Messung des B-Wirkungsquerschnitts existieren zwei verschiedene Kategorien: Die erste Möglichkeit ist die Messung der *exklusiven Zerfallskanäle* der B-Mesonen, dieses ist jedoch aufgrund der niedrigen Rekonstruktionswahrscheinlichkeit schwierig. Die

zweite Möglichkeit verwendet *inklusive Messungen* einiger markanter Zerfallskanäle der B-Mesonen, wie z. B. den Zerfall $b\bar{b} \rightarrow J/\psi + X \rightarrow l^+l^- + X$ oder semileptonische Zerfälle $b\bar{b} \rightarrow l^+l^- + X$. HERA-B ist dabei in der Lage sowohl den Myon- als auch den Elektronkanal zu untersuchen.

Modelle der Quarkonium-Produktion

Schwere Quarkonia $Q\overline{Q}$ sind ein interessanter Anwendungsfall der pertubativen QCD. Die Quarkmassen geben eine Skala vor, die eine störungstheoretische Behandlung erlauben. Ebenso kann die Produktion von $Q\overline{Q}$-Paaren störungstheoretisch behandelt werden. Im Moment existieren zwei Modelle für die Produktion schwerer Quarkonia Zustände. Das so genannte *Color Singlet Model (CSM)*[7] geht davon aus, dass die $Q\overline{Q}$-Paare direkt ein Farbsingulettpaar bilden: Nur solche $Q\overline{Q}$-Paare, die innerhalb einer Zeitskala von $1/m_Q$ in einem farbneutralen Zustand mit den gleichen Quantenzahlen wie ein Quarkonium vorliegen, können in dieses Quarkonium übergehen. Im zweiten Modell, dem *Color Octet Modell (COM)*[8] kann das $Q\overline{Q}$-Paar seine Farbladung über die Aussendung weicher Gluonen neutralisieren, bevor das Quarkonium gebildet wird. Beide Modelle stimmen nicht in allen Bereichen mit den experimentellen Ergebnissen überein. Darüber hinaus sind die existierenden Messungen auf den Vorwärtsraumbereich, also den Bereich positiver x_F limitiert.[9] HERA-B ist das erste Experiment, das zusätzlich in der Lage ist, auch den Rückwärtsbereich, also den Bereich negativer x_F, zu vermessen, in dem die Vorhersagen der verschiedenen Modelle stärker voneinander abweichen.

Nukleare Unterdrückung

Der totale Produktionswirkungsquerschnitt der J/ψ-, ψ'- und χ_c-Mesonen wie auch die Winkelverteilung ihrer Zerfälle ist sensitiv für nukleare Effekte. Abhängig davon, ob das Charmonium ($c\bar{c}$) in einer Proton-Proton-Wechselwirkung oder in einer Proton-Kern-Wechselwirkung erzeugt wird, ergibt sich abhängig von der umgebenden nuklearen Materie ein unterschiedlicher Wirkungsquerschnitt. Man spricht von der so genannten *nuklearen Unterdrückung*. Die Unterdrückung kann in der Form

$$\sigma_{p,A} = \sigma_{p,N} \cdot A^{\alpha} \tag{1.72}$$

dargestellt werden, wobei $\sigma_{p,N}$ den Wirkungsquerschnitt in Proton-Proton-Wechselwirkung darstellt, $\sigma_{p,A}$, den Wirkungsquerschnitt in Proton-Nukleon-Wechselwirkung, A die Atommasse des Targets und α einen Parameter, der die Unterdrückung beschreibt. Entsprechende Unterdrückungen wurden z. B. in Pb-Pb-Wechselwirkungen gemessen [Abr 99]. α stellt hierbei eine Funktion des Transversalimpulses p_T[10], und der Feynman-Variable x_F dar. Um zu untersuchen, ob dieser Effekt auf nukleare Wechselwirkungen

[7] Farb-Singulett-Modell

[8] Farb-Oktett-Modell

[9] Die *Feynman-Variable* x_F ist ein Maß für den longitudinalen Impuls eines Teilchens. Sie ist definiert als $x_F = \frac{p_z}{p_{z,max}} \approx \frac{2p_{z,CMS}}{\sqrt{s}}$, wobei s die Schwerpunktsenergie angibt und $p_{z,CMS}$ den Impuls in Strahlrichtung im Schwerpunktssystem.

[10] Unter dem Transversalimpuls p_T versteht man den Impuls senkrecht zur Strahlrichtung (in z-Richtung): $p_T = \sqrt{p_x^2 + p_y^2}$

zurückzuführen ist, sind weitere Messungen notwendig. Im Gegensatz zu anderen Experimenten wie E866 [Lei 00] ist HERA-B in der Lage, einen Großteil der zugehörigen Teilchen zu rekonstruieren und besitzt damit analog wie Fixed-Target-Experimente die Möglichkeit die Unterdrückung als Funktion der Gesamttransversalenergie eines Ereignisses zu messen und damit zum Verständnis der Unterdrückungsmechanismen beizutragen [HER 00].

Drell-Yan-Physik

Unter Drell-Yan-Prozessen [Dre 70] versteht man die Erzeugung eines Leptonpaares aus einer elektroschwachen Vernichtung zweier Quarks in einer Hadron-Hadron-Kollision. Aufgrund des Einflusses der Strukturfunktion des Hadrons und Effekten höherer Ordnung in den Matrixelementen kann dieser Prozess auch als Test für die QCD herangezogen werden. Einen möglichen Test bietet die Messung der Winkelverteilung der Leptonzustände des Drell-Yan-Prozesses. Die pertubative QCD sagt für die Winkelverteilung

$$\frac{d\sigma}{d\omega} \sim 1 + \lambda \cos^2\theta + \mu \cos\theta \sin 2\theta + \frac{\nu}{2} \cos 2\phi \sin^2\theta \tag{1.73}$$

voraus, wobei θ der Polarwinkel zwischen dem l^+ und der z-Achse im Ruhesystem des virtuellen Photons und ϕ der Azimuthwinkel ist. Die Koeffizienten λ und ν sind über die Lam-Tung-Beziehung miteinander verknüpft [Lam 78],[Lam 80]:

$$\lambda = 1 - 2\nu \ . \tag{1.74}$$

Im Falle eines Pion-Strahls wurde von dem Experiment NA10 eine Verletzung dieser Beziehung für größere Transversalimpulse der beiden Leptonen gemessen [Fal 86, Gua 88], für den Fall eines Protonen-Strahls war es bislang nicht möglich die Beziehung zu testen. Zur Erklärung der Verletzung existieren verschiedene Modelle, die z. B. auf selektiert berechenbaren Termen höherer Ordnung[11] [Ber 79, Ber 80] und großen intrinsischen p_T-Werte der Partonen beruhen. Bisher vermag keines der Modelle alle verfügbaren experimentellen Ergebnisse zu beschreiben. Es existieren jedoch Modelle [Bra 93], welche in der Lage sind, die Ergebnisse von NA10 zu beschreiben. Sie beruhen auf Color-Domänen im Proton, die eine Korrelation der Spinausrichtung der beiden einlaufenden Teilchen hervorrufen. Die existierenden experimentellen Ergebnisse reichen noch nicht aus, um zwischen den verschiedenen Modellen unterscheiden zu können. Das Experiment HERA-B kann aufgrund seiner hohen Auflösung und der großen kinematischen Akzeptanz hier deutlich zu Verbesserungen führen. Ein weiterer Bereich der Drell-Yan-Physik umfasst die Drell-Yan-Produktion bei hohem Transversalimpuls, die eine saubere Art der Messung der Gluon-Strukturfunktion des Protons ermöglicht.

[11] so genannten 'higher-twist'-Effekten

Kapitel 2

Der HERA-B Detektor

Das Experiment HERA-B ist eines der vier Experimente am Proton-Elektron-Speicherring HERA des Deutschen Elektronen-Synchrotrons (DESY) in Hamburg und verwendet den Protonenstrahl und ein internes Target zur Erzeugung von schweren Quark-Antiquarkpaaren in Proton-Nukleon-Kollisionen. Der Detektor wurde für die Messung der CP-Verletzung in den so genannten goldenen Zerfällen neutraler B-Mesonen optimiert. In diesem Kapitel sollen die Anforderungen an den Detektor aufgezeigt werden und ein Überblick über die einzelnen Detektorsysteme gegeben werden. Das Spurkammersystem und das elektromagnetische Kalorimeter werden hierbei vertieft dargestellt, da sie für den Inhalt dieser Arbeit, das ECAL Pretrigger System, eine besondere Bedeutung besitzen.

2.1 Anforderungen an den HERA-B Detektor

Die Messung der CP-Verletzung im System der B-Mesonen sollte im Experiment HERA-B anhand der Messung des Parameters $\sin(2\beta)$, durch Bestimmung des Unterschiedes zwischen dem Anteil der Zerfälle von B^o- und $\overline{B^o}$-Mesonen in den Endzustand $J/\psi\ K_s^o$, erfolgen. Dieser so genannte goldene Zerfall zeichnet sich durch eine klare, leicht zu rekonstruierende Signatur aus: So erfolgt z. B. der Nachweis des J/ψ-Mesons über den Zerfall $J/\psi \rightarrow l^+l^-$ des J/ψ-Mesons in zwei Leptonen l mit hohem Transversalimpuls. Zur Messung und zur Rekonstruktion dieses Zerfalls werden folgende Anforderungen an den Detektor gestellt:

- *Unterdrückung von Untergrundereignissen*
  Die gesuchten Ereignisse sind um mehr als sechs Größenordnungen seltener als inelastische Untergrundereignisse. Da eine Speicherung der gesamten anfallenden Datenmenge weder möglich noch wünschenswert ist, muss bereits während der Datennahme eine schnelle und effiziente Identifikation, Selektion und Reduktion der Datenmenge mittels eines entsprechenden Datennahme und Trigger Systems erfolgen.

- *Bewältigung einer sehr hohen Spurdichte*
  Um eine ausreichend große Anzahl an B-Zerfällen zu erhalten, ist die Wechselwirkungsrate so hoch gewählt, dass typischer Weise vier bis fünf Wechselwirkungen pro Ereignis überlagert sind. Dadurch beträgt die Teilchendichte $\rho_{Teilchen}$ pro Sekunde

in Abhängigkeit des radialen Abstands R vom Protonenstrahl [Sch 00]

$$\rho_{Teilchen} = \frac{3 \cdot 10^7}{R^2} \cdot \frac{1}{s} \,. \tag{2.1}$$

Dies führt zu Strahlenbelastungen von bis zu 100 krad/Jahr in Strahlrohrnähe. Inklusive der Sekundärteilchen kommt es zu ungefähr 200 überlagerten Spuren pro Ereignis. Der Detektor muss so gebaut sein, dass er diese sehr hohe Teilchendichte und Strahlenbelastung unbeschadet übersteht und in der Lage ist, die einzelnen Teilchenbahnen zu rekonstruieren und die Teilchensorte zu identifizieren.

- *Effektive Rekonstruktion des goldenen Zerfalls*
  Um eine effektive Rekonstruktion des goldenen Zerfalls zu ermöglichen, soll der Detektor einen möglichst großen Bereich des Raumwinkels abdecken. Zur Rekonstruktion der B-Mesonen mit entsprechend hoher Massenauflösung wird zum einen eine hohe Impulsauflösung gefordert, zum anderen zur Identifikation der B-Mesonen mittels der Zerfallsvertices eine hohe Ortsauflösung bei der Bestimmung der Primär- und Sekundärvertices benötigt. Weiterhin wird eine schnelle und effiziente Myon- und Elektronidentifikation zur Selektion der Leptonen des Zerfalls $J/\psi \to l^+l^-$ gefordert, sowie eine effiziente Identifikation von Kaonen und Leptonen für das Tagging des Zerfalls.

Im Folgenden wird zunächst ein Überblick über den Detektor gegeben, bevor die Erzeugung der B- und J/ψ-Mesonen dargestellt wird. Daran anschließend erfolgt eine genauere Vorstellung der einzelnen Detektorsysteme mit einer vertieften Vorstellung des Elektromagnetischen Kalorimeters und des Spurkammersystems. Die Darstellung des Trigger und Datennahme Systems erfolgt im nächsten Kapitel.

2.2 Der Aufbau des Experimentes im Überblick

Zur Rekonstruktion aller Spuren geladener Teilchen, sowie zur Identifikation der Teilchen, teilt sich der HERA-B Detektor in verschiedene Detektoren zur *Spurerkennung* und zur *Teilchenidentifikation* auf, und besitzt in der Vertikalen eine geometrische Akzeptanz von 10 bis 160 mrad, in der Horizontalen eine Akzeptanz von 10 bis 220 mrad. Er deckt damit 90 % des Raumwinkels ab. Abbildung 2.1 gibt einen Überblick über den Detektor. Die x-Achse des HERA-B Koordinatensystems zeigt innerhalb der Ringebene auf das Zentrum der Hadron-Elektron-Ringanlage (HERA), an dem das Experiment arbeitet, die z-Achse in Flugrichtung der Protonen und die y-Achse senkrecht zur xz-Ebene nach oben.

Zur Spurerkennung und Vertexrekonstruktion dient der zusammen mit dem Drahttarget in einem Vakuumtank sitzende *Siliziumstreifen-Vertexdetektor* (SVD). Das sich daran anschließende *Spurkammersystem* dient zur Rekonstruktion der Teilchenspuren zwischen dem Vertexdetektor und den weiter entfernt liegenden Teilchenidentifikationsdetektoren. Zusätzlich befindet sich hinter dem Vertexdetektor ein Dipolmagnet. Das Spurkammersystem ermöglicht die Verfolgung der Spuren im Magnetfeld und so eine Impulsbestimmung der Teilchen. Es besteht aus den *inneren* und *äußeren Spurkammern* (ITR[1] und OTR[2]) und erstreckt sich bis zum Myonsystem.

[1] *Inner TRacking system* — engl. für Inneres Spurkammerystem
[2] *Outer TRacking system* — engl. für Äußeres Spurkammersystem

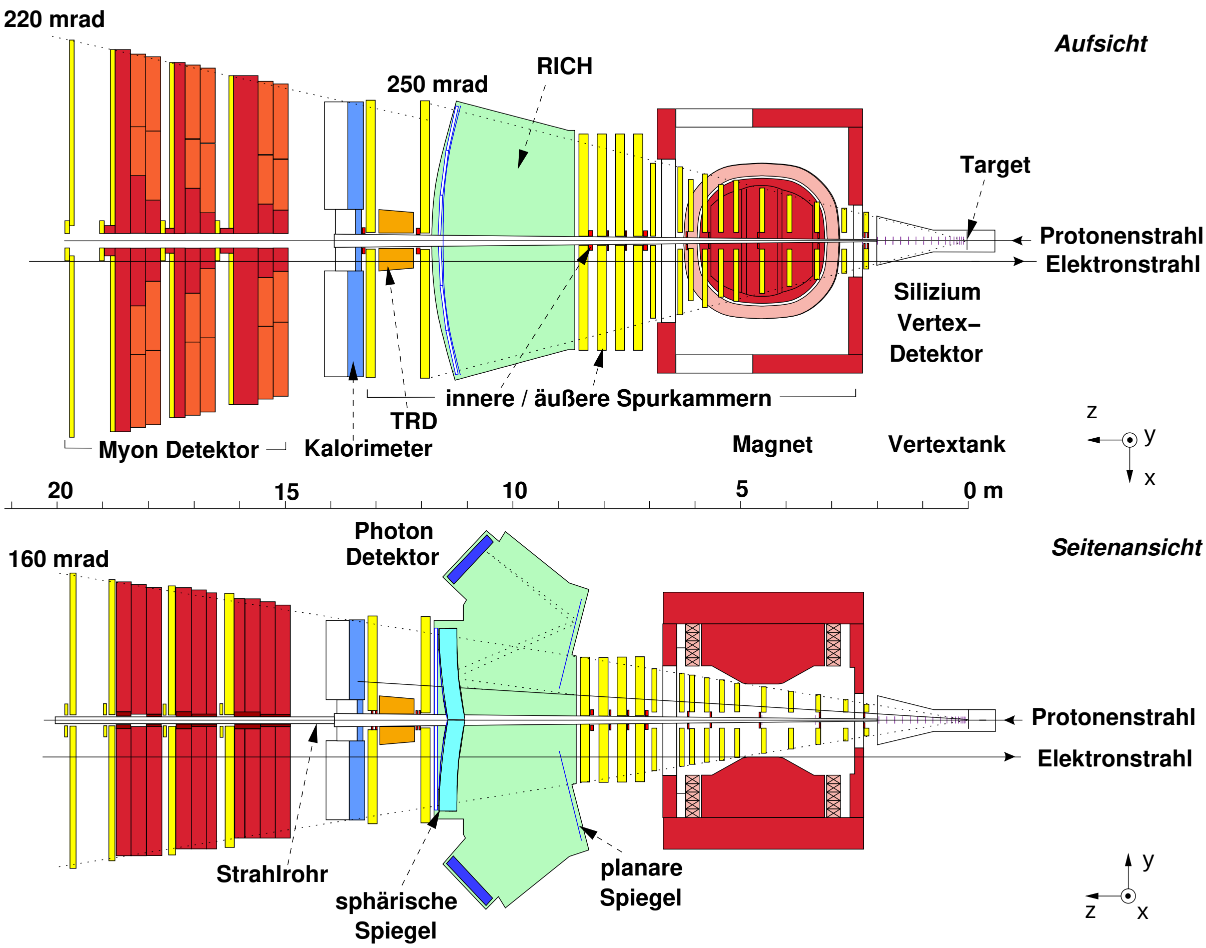


Abbildung 2.1: *Aufsicht und Seitenansicht des HERA-B Detektors.*

Die Teilchenidentifikation von Kaonen und Pionen erfolgt durch den sich zwischen den Spurkammern befindlichen *Ringbild-Čerenkovzähler* (RICH)[3], die Identifikation von Elektronen bzw. Positronen und Photonen erfolgt zusammen mit der Energiemessung durch das sich hinter dem Spurkammersystem befindliche *elektromagnetische Kalorimeter* (ECAL). Unmittelbar vor dem Kalorimeter befindet sich der im protonenstrahlrohrnahen Bereich angebrachte *Übergangsstrahlungsdetektor* (TRD)[4] zur Trennung von Elektronen und Positronen von Hadronen bei hohem Teilchenfluss. An das elektromagnetische Kalorimeter schließt sich das *Myonsystem* (MUON) zur Identifikation und zur Spursuche von Myonen an. Es besteht aus einem Spurkammersystem und massiven Abschirmblöcken, die dafür sorgen, dass Hadronen absorbiert werden und nur Myonen mit einem Impuls von mehr als 4,5 GeV das komplette Myonsystem durchdringen können.

Die Gesamtzahl an Auslesekanälen beträgt ca. 600.000. Im Folgenden wird zunächst die Hadron-Elektron-Ring-Anlage und das Drahttarget des Experimentes vorgestellt und danach das Spurerkennungssystem und das Teilchenidentifikationssystem mit ihren jeweiligen Subdetektoren.

[3] *Ring Imaging CHerenkov Counter* — engl. für Ringbild-Čerenkovzähler
[4] *Transition Radiation Detector* — engl. für Übergangsstrahlungsdetektor

2.3 Hadronische Produktion von B- und J/ψ-Mesonen

2.3.1 Die Hadron-Elektron-Ring-Anlage (HERA)

Die Hadron-Elektron-Ring-Anlage am DESY in Hamburg ist ein Doppelspeicherring für Elektronen bzw. Positronen und Protonen. Nach dem Durchlaufen einer Kette von Vorbeschleunigern (Abb. 2.2) werden die beiden Teilchenarten in separaten Strahlrohren mit entgegengesetzter Umlaufrichtung auf ihre Endenergie beschleunigt und gespeichert. Die Protonen besitzen eine Strahlenergie von $E_p = 920\,\mathrm{GeV}$, die Elektronen bzw. Positronen eine Strahlenergie von $E_e = 28\,\mathrm{GeV}$. In zwei der vier Wechselwirkungszonen werden die beiden Strahlen bei einer Schwerpunktsenergie von $\sqrt{s} = 318,1\,\mathrm{GeV}$ zur Kollision gebracht. An diesen beiden Punkten messen die beiden Universaldetektoren H1 [Abt 97] und ZEUS [Zeu 93], deren Hauptaugenmerk Untersuchungen zur Protonenstruktur mittels tiefinelastischer ep-Streuung sind. Das dritte Experiment, HERMES [Ack 98], benutzt nur den polarisierten Elektronenstrahl zur Untersuchung der Spinstruktur des Protons und des Neutrons mittels eines internen Gastargets. Das Experiment HERA-B, am vierten Wechselwirkungspunkt, verwendet nur den Protonenstrahl mittels eines internen Targets für die Erzeugung schwerer Quarks.
Die Protonen im Protonenstrahl sind in Protonenpaketen, so genannten *Bunchen*, zusammengefasst. Der zeitliche Abstand zwischen zwei Bunchen beträgt 96 ns, d. h. die Rate – auch *Bunch-Crossing-Rate* (BX) genannt –, mit der die Protonen am Target von HERA-B vorbeikommen, beträgt 10,41 MHz. Der Speicherring kann mit maximal 220 dieser Bunche gefüllt werden, wobei jedoch aus Gründen einer sicheren Injektion und Extraktion des Protonenstrahls nur 180 davon mit Protonenpaketen gefüllt sind [Sch 98]. Die mittlere Protonenpaketrate beträgt also

$$\overline{R_p} = \frac{180}{220} \cdot 10,41\ \mathrm{MHz} \ = 8,52\ \mathrm{MHz} \quad .$$

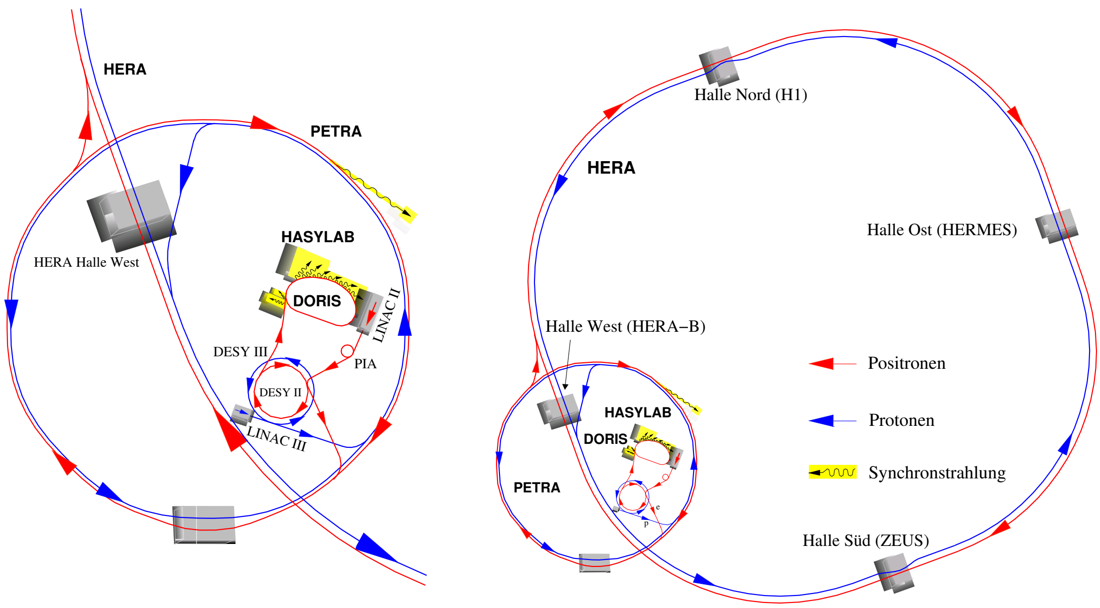


Abbildung 2.2: *Der HERA-Beschleunigerring (rechts) des Deutschen Elektronen-Synchrotrons und seine Vorbeschleuniger (links). Das HERA-B Experiment befindet sich in der Experimentierhalle West zwischen den beiden Injektionspunkten.*

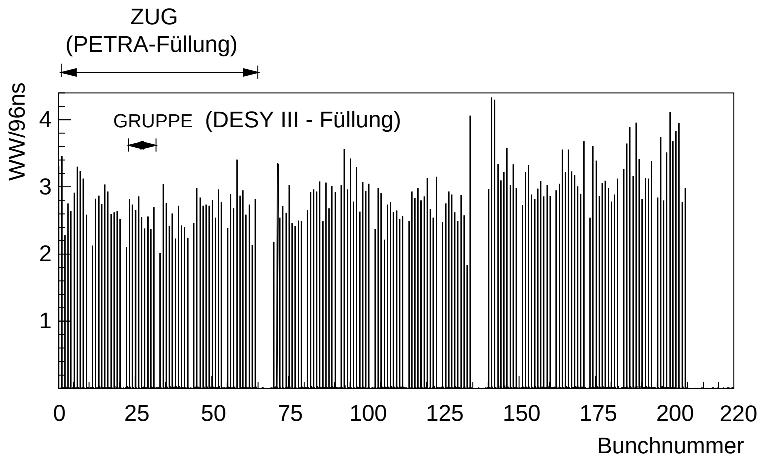


Abbildung 2.3: *Messung der Anteile einzelner Protonenpakete zur Illustration des HERA-Protonenring Füllschema. Nur 180 der 220 möglichen Zeitfenster sind mit Protonenpaketen gefüllt.*

Die Protonenpakete sind in Gruppen von zehn Paketen zusammengefasst, denen jeweils ein freies Zeitfenster folgt, sechs dieser Gruppen bilden einen Zug. Zwischen den ersten drei Zügen sind jeweils fünf Zeitfenster unbesetzt, nach dem dritten Zug sind 15 Zeitfenster unbesetzt (Abbildung 2.3).
Durch die Bunchstruktur der Protonen im HERA-Speicherring ergibt sich also für das Experiment HERA-B eine Zeitstruktur von 96 ns, auf die das komplette Datennahme- und Detektorsystem ausgerichtet ist.

2.3.2 Das Drahttarget

Aufgabe des HERA-B Targets ist es, durch eine Wechselwirkung zwischen den Targetdrähten und den Strahlprotonen, die sich im Halo des Protonenstrahls befinden, schwere Quarks zu erzeugen. Das Drahttarget wird dazu in den Außenbereich des Protonenstrahls in dem Bereich zwischen 3 und 6 σ der Dichteverteilung gefahren, und die Targetrate durch eine Korrektur der Position variiert bzw. konstant gehalten.
Die natürliche Verlustrate an Protonen hängt von der Zahl der Protonen ($\approx 2 \cdot 10^{13}$) im Protonenstrahl und der Lebensdauer der Protonen im Strahl ($\approx$ 100 Stunden) ab, und beträgt ungefähr 10 MHz. Etwa 30 bis 60 % der verloren gegangenen Protonen von HERA wechselwirken mit den Targetdrähten [Ehr 97].
Um bei einer Protonenpaketrate von 8,52 MHz eine Wechselwirkungsrate von 40 MHz zu erreichen, benötigt man durchschnittlich 4,7 Wechselwirkungen pro Protonenpaket. Um diese verschiedenen Wechselwirkungen gut voneinander trennen zu können, und so die Zuordnung der Spuren zu den einzelnen Wechselwirkungen zu vereinfachen, ist das Target von HERA-B aus zwei Stationen mit je vier Drähten aufgebaut: Jede der Stationen besteht aus zwei senkrechten Drähten links und rechts vom Strahl, sowie zwei waagerechten Drähten oberhalb und unterhalb des Strahls, wobei jeder Draht auf einer Gabel montiert ist, die zum Strahl hin verschoben werden kann. Der Abstand der beiden Targetstationen beträgt 4 cm. Abbildung 2.4 zeigt den schematischen Aufbau der Targetstationen.
Sowohl der Wirkungsquerschnitt der Erzeugung von b-Quarks $\sigma_{b\bar{b}}$, der Gesamtwirkungsquerschnitt der inelastischen Wechselwirkungen σ_{tot}, als auch die mittlere Anzahl an

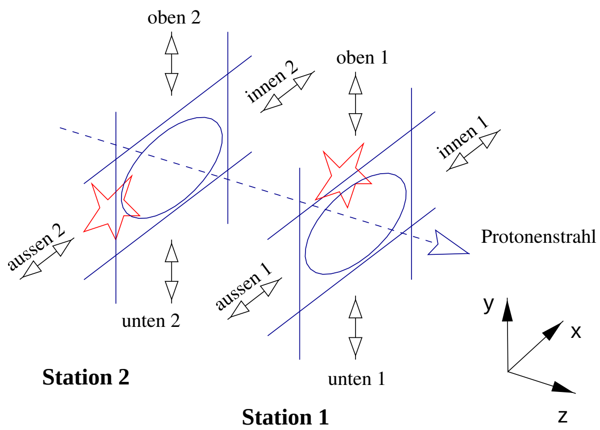


***Abbildung 2.4:** Aufbau der beiden Targetstationen mit je vier Drähten. Die radialen Bewegungsrichtungen der einzelnen Drähte sind durch die Doppelpfeile angedeutet [Sym 00].*

geladenen Spuren $< n_{spur} >$, hängen von der Atommassenzahl A ab [Loh 94]:

$$\sigma_{b\bar{b}} \propto A \tag{2.2}$$
$$\sigma_{tot} \propto A^{2/3} \cdot ((1,3 \pm 0,1) + 0,15 \cdot \log_{10} A) \qquad (\text{für} \quad A \geq 7) \tag{2.3}$$
$$< n_{spur} > \propto A^{0,2} \tag{2.4}$$

Um eine möglichst hohe Anzahl an Wechselwirkungen mit Erzeugung schwerer Quarks und eine möglichst geringe Anzahl inelastischer Wechselwirkungen zu erhalten, muss ein Kompromiss bei der Wahl des Targetmaterials eingegangen werden. Für die Datennahme 2000 war die erste Station mit Titan (Ti) Drähten ausgestattet, die zweite Station mit Aluminium (Al), Wolfram (W), Kohlenstoff (C) sowie Titan Drähten. Die Drähte besitzen in Strahlrichtung eine Ausdehnung von 500 μm, in der Ebene senkrecht zum Strahl eine Ausdehnung von 50 μm [Ehr 97].

2.4 Das Spurerkennungssystem

2.4.1 Das Vertexdetektor System (VDS)

Der Silizumstreifen-Vertexdetektor hat die Aufgabe, sowohl die Orte der primären inelastischen Wechselwirkungen, die so genannten *primären Vertices*, als auch die Zerfallsorte langlebiger Teilchen[5], die so genannten *sekundären Vertices*, sehr präzise zu vermessen. Bei HERA-B interessiert hierbei insbesondere die Rekonstruktion der Zerfallsvertices der B-Mesonen. Um eine effektive Separation der Sekundärvertices von den Primärvertices zu ermöglichen, sowie eine für eine Spurerkennung genügend große Granularität zu besitzen, sollte die Vertexauflösung σ_{vtx} signifikant besser sein, als die mittlere Zerfallslänge b der B-Mesonen ($b \approx 13$ mm). Für die transversale Auflösung werden $\sigma_{x,y} \approx 25$ μm und für die longitudinale Auflösung $\sigma_z \approx 500$ μm angestrebt [Rie 97].
Die genannten Anforderungen lassen sich mit einem Siliziumstreifen-Detektor erfüllen. Siliziumstreifen-Detektoren sind Dioden mit einem in Sperrrichtung betriebenen *p-n*-Übergang. Sie besitzen einen an beweglicher Ladung verarmten sensitiven Bereich und ein elektrisches Feld, welches durch Ionisation erzeugte Ladungen zu den Elektroden driften lässt (Abbildung 2.5). Der Abstand zwischen zwei Streifen beträgt bei HERA-B 25 μm, wobei nur jeder zweite Streifen ausgelesen wird. Die Siliziumdetektoren sind doppellagig

[5]Unter langlebigen Teilchen werden alle Teilchen mit Lebensdauern von $\tau \geq 10^{-12}$ s verstanden.

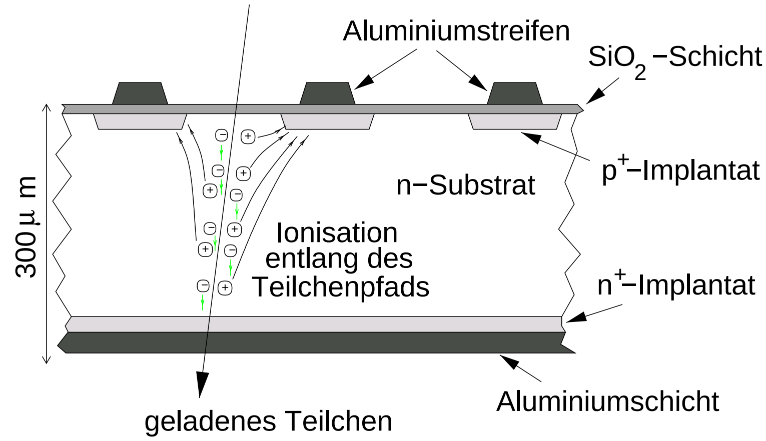


Abbildung 2.5: *Aufbau und Funktionsweise eines Siliziumstreifenzählers [Wag 99].*

ausgelegt – auf der Vorderseite befinden sich p-dotierte Streifen und auf der Rückseite, um 90° rotiert, n-dotierte Streifen. Jeweils zwei dieser doppellagigen Siliziumdetektoren, im Winkel von 5° gegeneinander verdreht, bilden eine Superlage, sodass vier Messebenen mit den Stereowinkeln von -2,5°, +2,5°, 87,5° und 92,5° relativ zur y-Richtung entstehen. Der aktive Bereich des Detektors kann bis auf 10 mm an den Strahl herangefahren werden, sodass eine geometrische Akzeptanz von 10 bis 250 mrad erreicht wird. Um die Strahlenbelastung während Nichtmesszeiten zu minimieren, und die Stabilität des Protonenstrahls während der Injektionsphase nicht zu beeinträchtigen[6], sind die Vertexdetektoren, um sie radial zurückziehen zu können, an einer fahrbaren Apparatur befestigt. Zusätzlich muss beachtet werden, dass die Materialmenge des Detektors möglichst gering gehalten wird, um die Anzahl an Vielfachstreuungen, und damit eine Verfälschung der Messung, möglichst gering zu halten. Der gesamte Vertexdetektor befindet sich deshalb zusammen mit dem Target in einem Vakuumtank, der an das Vakuum des HERA-Protonenbeschleunigers (10^{-8} mbar) angeschlossen ist, und so die Durchführung des Protonenstrahls ohne zusätzliche Strahlröhre ermöglicht, was zu einer deutlichen Reduzierung des Materials und damit der Vielfachstreuungen führt. Da ein Einbau der Detektoren in das Vakuum des HERA-Beschleunigers das Vakuum verschlechtern würde, werden die Detektoren in beweglichen Töpfen, so genannten Romanpots, in einem Sekundärvakuum (10^{-6} mbar) montiert. Abbildung 2.6 zeigt den schematischen Aufbau des Vertexdetektors.

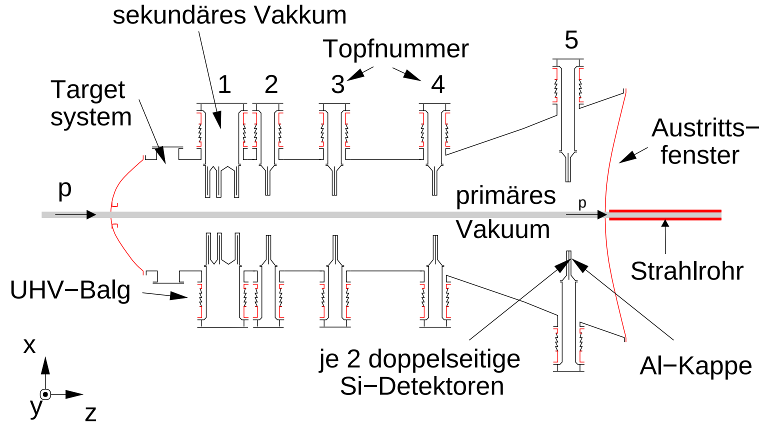


Abbildung 2.6: *Schematischer Aufbau des Vertexdetektors [Wag 99].*

[6] Die Breite des Protonenstrahls ist während der Injektionsphase um einen Faktor vier bis fünf größer als während des normalen Strahlbetriebs [Ehr 01].

2.4.2 Das Spurkammersystem

Das Spurkammersystem zur Spur- und Impulsmessung erstreckt sich vom Austrittsfenster des Vertexdetektors bis zum elektromagnetischen Kalorimeter. Es besteht aus 13 Superlagen, die jeweils Spurkammmern verschiedener Orientierung kombinieren. Die Spurdichte $\frac{dN}{dA}$ sinkt mit wachsendem Abstand R zum Protonenstrahlrohr (Gleichung 2.1): Um dieser Spurdichteverteilung Rechnung zu tragen, teilt sich das Spurkammersystem in zwei Teile auf: Mikrostreifen Gaskammern (MSGC)[7] decken den Bereich $R \lesssim 19$ cm und bilden das *innere Spurkammersystem*, während Honigwabendriftkammern den Bereich $R \gtrsim 19$ cm abdecken und das *äußere Spurkammersystem* bilden. Die Detektorbelegungsdichten sollten so 20 % nicht überschreiten. Abbildung 2.7 zeigt die Anordnung der Superlagen. Superlagen, die im First Level Trigger verwendet werden, sind dunkel markiert.
Die 13 Superlagen teilen sich in drei Gruppen auf: Sieben Superlagen im Spektrometermagneten bilden das *Magnetkammersystem*, vier Superlagen in der feldfreien Zone hinter dem Magneten und vor dem RICH das *Spurerkennungssystem*, und zwei Superlagen zwischen RICH und ECAL das so genannte *Triggerkammersystem*[8].

Das HERA-B Magnetsystem

Der HERA-B Detektor besitzt einen Dipolmagneten, um den Impuls der geladenen Teilchen durch ihre Ablenkung im Magnetfeld zu bestimmen. Der Magnet ist aus zehn normal leitenden Spulen – jeweils fünf oberhalb und fünf unterhalb des Protonenstrahlrohrs – sowie Polschuhen und Rückflussjoch aus magnetischem Eisen aufgebaut. Das Magnetfeld des Dipolmagneten ist näherungsweise zylindersymmetrisch entlang der y-Achse ausgerichtet, was zu einer alleinigen Ablenkung in $\pm\, x$-Richtung der in z-Richtung fliegenden Teilchen führt, während in y-Richtung praktisch keine Ablenkung stattfindet. Um die abgelenkten Spuren zu rekonstruieren, ist die Breite des Detektors größer als seine Höhe (Abb. 2.1).
Die Position des Magneten stellt einen Kompromiss zwischen der Akzeptanz für spät zerfallende K_s^o und einer größtmöglichen Apertur dar. Das Zentrum des Magneten befindet sich 4,5 m hinter dem Target, sodass 85 % der K_s^o-Mesonen bis dorthin zerfallen sind, und folglich nachgewiesen werden können. Der Magnet begrenzt die geometrische Akzeptanz in der Vertikalen auf den Winkelbereich kleiner 160 mrad, in der Horizontalen auf den Bereich kleiner 250 mrad. Die Anforderungen an die Impulsauflösung liegen bei $\Delta p/p \approx 0,5\,\%$, die maximale magnetische Flussdichte beträgt deshalb 0,8 T, das Wegintegral für Teilchen, die das Magnetfeld in der Nähe der Strahlachse durchqueren, 2,126 Tm [Tho 96], [Har 95]. Gegenwärtig wird eine Auflösung von ungefähr $\Delta p/p \approx 1,8\,\%$ erreicht [Lan 01].
Da sowohl der Protonen- als auch der Elektronenstrahl möglichst unbeeinflusst durch den Magneten hindurch geführt werden müssen, wird die Ablenkung des Protonenstrahls durch mehrere Korrekturmagneten strahlaufwärts des HERA-B Experimentes korrigiert. Der Elektronenstrahl wird durch ein Strahlrohr hoher Permeabilität abgeschirmt und ebenfalls durch Korrekturmagnete korrigiert [Har 95].

[7] *Micro Strip Gaseous Chambers* — engl. für Mikrostreifen Gaskammern

[8] Der Begriff ist etwas irreführend, da auch andere Superlagen für das Trigger System verwendet werden.

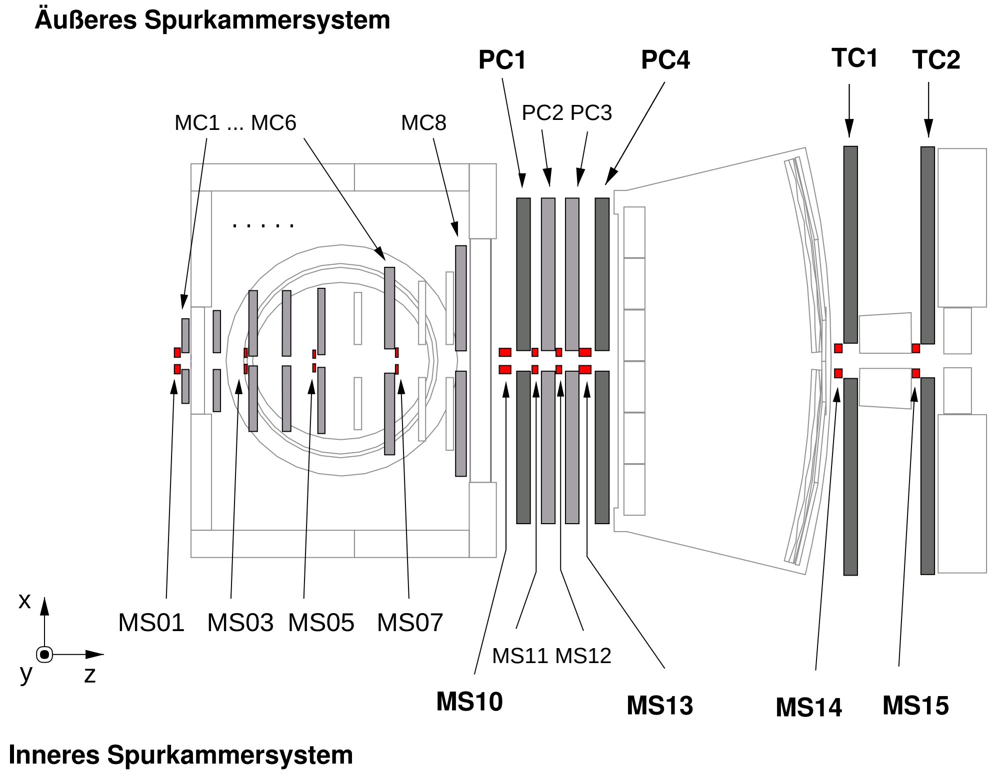


Abbildung 2.7: *Superlagen des äußeren und inneren Spurkammersystems. Erkennbar sind drei Gruppen von Spurkammern: MS01-MS07 und MC01-MC08 im Bereich des Spektrometermagneten (Magnetkammersystem), MS10-MS13 und PC01-PC04 zwischen Spektrometermagnet und RICH (Spurerkennungssystem), sowie MS14, MS15, TC1 und TC2 zwischen RICH und ECAL (Triggerkammersystem) (vgl. Abb. 2.1). Superlagen, die für die erste Triggerstufe verwendet werden, sind fett gedruckt.*

Das innere Spurkammersystem (ITR)

Um in den Bereichen hoher Belegungsdichte in Strahlrohrnähe eine effektive Musterekennung durchführen zu können, wurden bei HERA-B Gasmikrostreifenkammern, so genannte MSGC, eingesetzt. Die lithographische Strukturierung der Grundplatte ermöglicht Anodenstreifenabstände von 300 μm und somit Besetzungszahlen von weniger als 5 %. Zur Rekonstruktion und Separation der einzelnen Spuren wird eine örtliche Auflösung von 100 μm in x und 1 mm in y gefordert.
Bei hohen Teilchendurchgangsdichten kann es bei zu hoher Kathodenspannung zu einer Gasentladung durch stark ionisierende Teilchen und damit zu Beschädigungen der Anodenstreifen kommen [Hot 98]. Durch Verwendung der neuartigen GEM[9]-Folie kann mit einer deutlich niedrigeren Kathodenspannung gearbeitet werden und somit Strahlenschäden durch Hadronen vermieden werden (Abbildung 2.8 (a)).
Dabei wird die Gasverstärkung auf zwei Bereiche – die so genannte GEM-Folie und die Anodenregion – aufgeteilt, sodass bereits geringere Kathodenspannungen ausreichen und Überschläge zwischen Anode und Kathode vermieden werden. Die GEM-Folie befindet sich in der Mitte der Kammer und besteht aus einer beidseitig dünn mit Kupfer beschichteten perforierten Kaptonfolie. Zwischen den beiden Seiten der Folie wird zur

[9] *Gas Electron Multiplier* — engl. für Gaselektronenvervielfacher

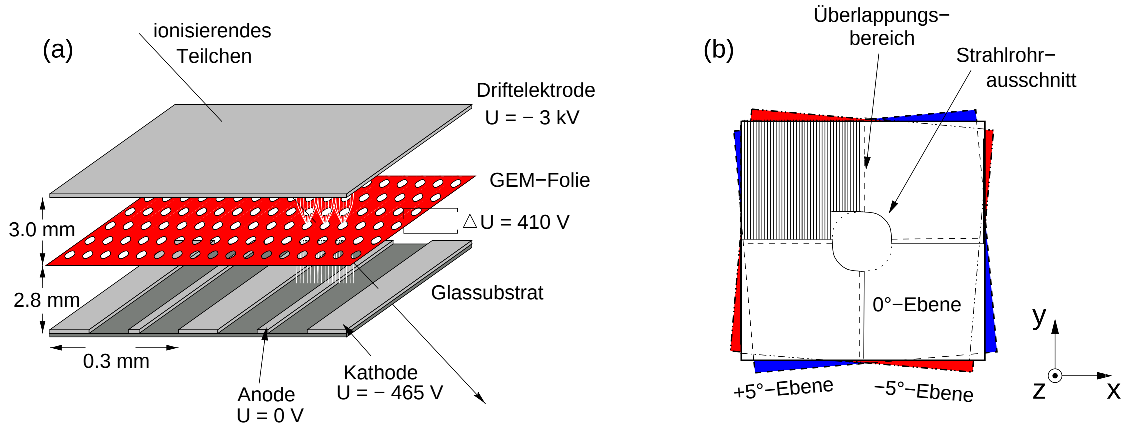


Abbildung 2.8: *(a) Schematische Darstellung eines Mikrostreifengasdetektors, wie er im inneren Spurkammersystem von HERA-B verwendet wird. Zwischen der Drift-Elektrode und der Substratfläche befindet sich eine GEM-Folie zur Erhöhung der Gasverstärkung (nach [Dre 98]). (b) Schematischer Aufbau einer Station des inneren Spurkammersystems. Jeweils vier, sich an den Rändern überlappende Kammern, bilden eine Einzellage. Drei dieser Einzellagen, in den drei Orientierungen -5°, 0°, +5° relativ zur y-Achse eingebaut, bilden eine Superlage (nach [Wer 00]).*

Erzeugung eines starken elektrischen Feldes im Bereich der Löcher eine Spannung von ungefähr 400 V angelegt. Passieren die durch den Durchgang eines ionisierendes Teilchen entstandenen Primärelektronen auf ihrem Driftweg diesen Hochfeldbereich, so kommt es zur Sekundärionisation. Typischerweise wird an der Anode eine Gasverstärkung von 100, an der GEM-Folie eine Verstärkung von 30 erreicht [Dre 98, Hau 99].
Jeweils vier $25 \times 25\ \mathrm{cm}^2$ große MSGCs bilden eine Detektorebene. Um nicht nur eine Koordinate messen zu können, wird je eine weitere Lage um $\pm 5°$ um die y-Achse verdreht eingebaut (Abb. 2.8). Damit ergibt sich eine Detektorauflösung von 800 μm in y- und 80 μm in x-Richtung. Gegenwärtig wird eine Auflösung von 150 μm erreicht [Gra 01]. Insgesamt besitzt das Innere Spurkammersystem ungefähr 140.000 Auslesekanäle. Die angestrebte Impulsauflösung beträgt $\Delta p/p \approx 2 \cdot 10^{-5} p\,[\,\mathrm{GeV}] \oplus 4 \cdot 10^{-3}$ [Har 95].
Alle Spurkammerlagen, die für die erste Triggerstufe benutzt werden, sind als Doppellage ausgelegt, um eine höhere Effizienz für die erste Triggerstufe zu erhalten, wobei jeweils die beiden Lagen mit einander verodert sind. Da darüber hinaus für den FLT nicht die volle Präzision benötigt wird, sind jeweils vier Kanäle analog miteinander verodert, d. h. sie werden von der ersten Triggerstufe als ein Streifen betrachtet: das Signal der Kammer wird in einem Komparator mit einer Triggerschwelle verglichen und aus jeweils vier benachbarten Kanälen ein digitales Triggersignal gebildet.

Das äußere Spurkammersystem (OTR)

Im äußeren Spurkammersystem kommen Honigwaben-Driftkammern zum Einsatz. Die Kathode ist in einer wabenförmigen Struktur gefaltet und besteht aus einer leitfähigen Kunststofffolie, die zur Erhöhung der Oberflächenleitfähigkeit und zur Reduzierung von Alterungserscheinungen mit Gold beschichtet ist (Abbildung 2.9). Die in der Mitte der so gebildeten Zelle liegenden Anodendrähte besitzen einen Durchmesser von 25 μm.

Durchquert ein Teilchen das Gasvolumen, so driften die durch die Ionisation des Gases entstandenen Elektronen aufgrund der zwischen der Anode und Kathode angelegten Driftspannung zu den Anodendrähten, und erzeugen dort ein elektrisches Signal. Abhängig vom Ort der Teilchenspur und damit vom Ort der Erzeugung der Elektronen ist die Driftzeit, die die Elektronen von ihrer Erzeugung bis zum Auftreffen auf der Anode benötigen, unterschiedlich. Für die erste Triggerstufe wird nur die Information, welcher Draht getroffen wurde, ausgelesen. Für die höheren Triggerstufen wird die Driftzeit durch einen Vergleich des Zeitpunktes des Signales mit einer Referenzzeit bestimmt und damit eine genauere Ortsmessung ermöglicht.

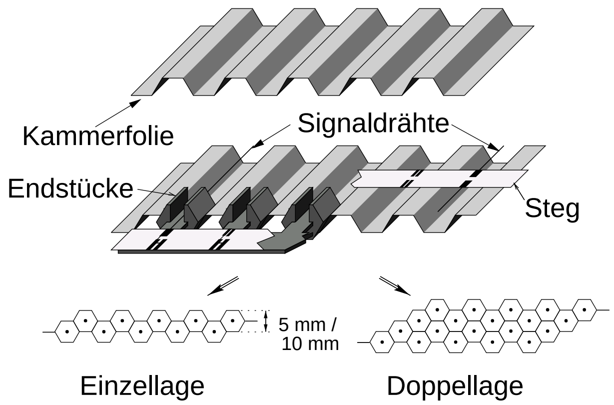


Abbildung 2.9: *Aufbau eines Honigwaben-Moduls des äußeren Spurkammersystems. Im unteren Teil der Abbildung ist links der Querschnitt einer Einzellage, rechts einer Doppellage (für die Kammern, die von der ersten Triggerstufe verwendet werden) dargestellt [Per 98].*

Das äußere Spurkammersystem überdeckt den Bereich von ungefähr 100 bis 250 mrad. Dies entspricht einem radialen Abstand von etwa 21 bis 300 cm. Der Durchmesser der Zellen beträgt im inneren, strahlrohrnahen Bereich 5 mm, weiter außen 10 mm. Die erwartete Belegungsdichte bei 40 MHz Wechselwirkungsrate liegt unter 20 %. Als Driftgas wird eine Mischung aus $Ar/CF_4/CO_2$ im Verhältnis 65:30:5 verwendet [Cap 00]. Mehrere kleine Kammermodule bilden zusammen eine Detektorlage, von denen wiederum wie im inneren Spurkammersystem je eine Lage in 0°, sowie in ± 5° zusammen eine Superlage bilden. Die Superlagen, die für die erste Triggerstufe verwendet werden (PC01, PC04, TC01, TC02 – vgl. Abbildung 2.7), sind als Doppellagen ausgelegt (vgl. Abbildung 2.9), und werden für die erste Triggerstufe gemeinsam miteinander verodert ausgelesen, um so eine Detektoreffizienz von mehr als 99 % für diese Superlagen zu erhalten.
Mit Hilfe der Driftzeit erhält man eine Ortsauflösung in x-Richtung von 200 μm [Cap 00], der Designwert der Impulsauflösung des Spurkammersystems liegt bei $\Delta p/p \approx 0,5\,\%$, gegenwärtig wird eine Auflösung von $\Delta p/p \approx 1,3\,\%$ erreicht [Lan 01].

2.5 Das Teilchenidentifikationssystem

2.5.1 Der Ringbild-Čerenkovzähler (RICH)

Bewegen sich geladene Teilchen in einem Medium mit dem Brechungsindex n und mit einer Geschwindigkeit $v > c/n$, so kommt es durch den Čerenkoveffekt zur Emission von Licht unter dem charakteristischen Winkel $\theta_C = \arccos(\frac{1}{\beta n})$ relativ zur Flugrichtung [Kle 92].
Durch eine Messung des Čerenkovwinkels kann so die Teilchengeschwindigkeit v bestimmt werden. Ist zusätzlich der Impuls p des Teilchens aus Messungen des Spursystems

bekannt, so kann die Masse des Teilchens berechnet werden und so eine Identifikation des Teilchens erfolgen. Bei HERA-B liegt die primäre Aufgabe des RICH in der Identifikation bzw. Unterscheidung von Kaonen und Pionen zur Flavormarkierung der Zerfälle mit geladenen Kaonen (vgl. Abb. 2.10).

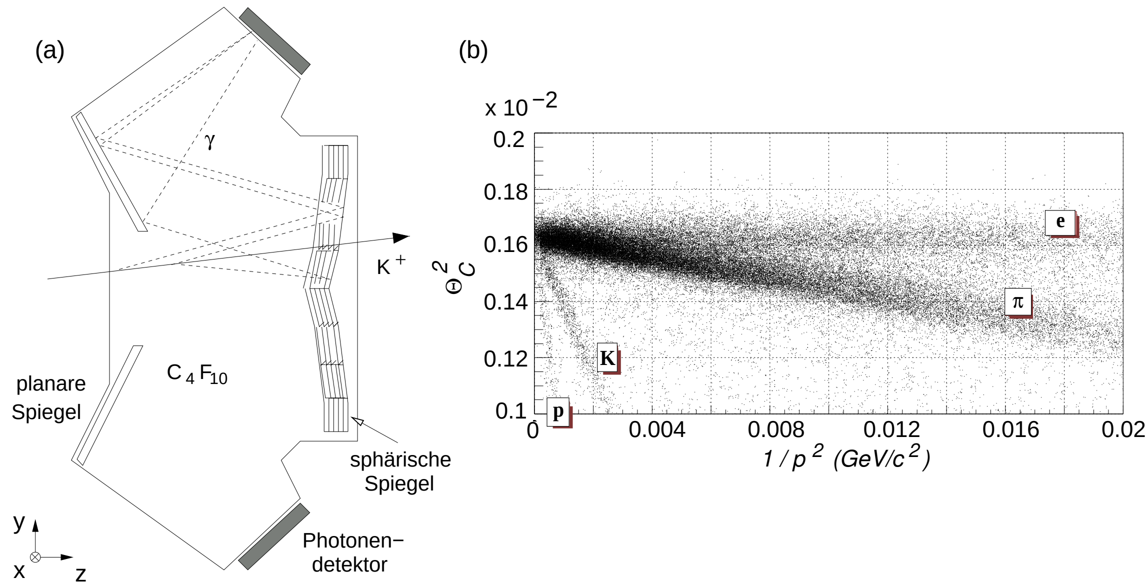


Abbildung 2.10: *(a) Schematische Darstellung des Čerenkov-Detektors [Škr 99]. Der Detektortank ist mit dem Radiatorgas C_4F_{10} (Freon) gefüllt. Die durch den Durchgang eines geladenen Teilchens entstandene Strahlung wird über sphärische und planare Spiegel auf eine Matrix von Photoelektronen-Vervielfacher abgebildet.*
(b) Messergebnisse des HERA-B RICH [Duj 00]. Für jedes Teilchen, das im RICH einen Ring erzeugte, ist θ_C^2 gegen $1/p^2$ aufgetragen, wobei p der Impuls des Teilchens ist. Der Čerenkov-Winkel steigt mit zunehmendem Impuls – bei großen Impulsen ist $\beta \approx 1$ für alle Teilchensorten und θ_C nimmt den maximalen Wert $\theta_0 = \arccos(1/n)$ an.

Der RICH [Seg 77] von HERA-B besteht aus einem mit dem Radiatorgas C_4F_{10} (Freon) gefüllten Tank, an dessen Rückwand zwei sphärische Spiegel aus 52 hexagonalen Spiegelsegmenten die emittierte Strahlung auf ein Feld planarer Spiegel reflektieren, die ihrerseits die Strahlung auf eine Matrix von Photoelektronen-Vervielfachern abbilden. Der Radius der beiden sphärischen Spiegel beträgt 11,5 m (vgl. Abbildung 2.10).
Der Čerenkovwinkel für Teilchen mit $\beta = 1$ beträgt 55,6 mrad [Sch 00], die Emissionsschwelle von Čerenkovlicht liegt für Pionen bei einem Impuls von 2,7 GeV, für Kaonen bei 9,6 GeV[Har 95]. Der RICH ist damit in der Lage, Pionen und Kaonen im Impulsbereich von 4 bis 80 GeV zu separieren, wobei ein Kaon im Impulsbereich von 4 bis 12 GeV als Nicht-Pion identifiziert wird [Ros 98]. Im Impulsbereich zwischen 4 und 60 GeV liegen ca. 90 % der Kaonen, die so mit Hilfe des RICH identifiziert werden können.

2.5.2 Das elektromagnetische Kalorimeter (ECAL)

Das Elektromagnetische Kalorimeter dient zur Identifizierung und Energiemessung von Elektronen und Positronen[10] sowie von Photonen. Darüber hinaus liefert es die Eingangs-

[10] Im Folgenden wird der besseren Lesbarkeit halber nur noch von Elektronen gesprochen. Damit sind, sofern nicht anders erwähnt, immer Elektronen und Positronen gemeint.

informationen für den ECAL Pretrigger (vgl. Kapitel 4), der das Pretriggersignal für die erste Triggerstufe erzeugt. Das Kalorimeter befindet sich ca. 13 m strahlabwärts vom Target unmittelbar hinter der letzten Spurkammerlage TC02 des Spurkammersystems (vgl. Abb. 2.1).
Zum Nachweis der Elektronen verwendet man zwei Effekte: Zum einen verlieren Elektronen beim Durchgang durch Materie bei hohen Energien (einige GeV) ihre Energie hauptsächlich in Form von Bremsstrahlungsphotonen. Zum anderen wird die Wechselwirkung hochenergetischer Photonen durch e^+e^--Paarbildung dominiert [Gru 96]. Durchquert ein Elektron das elektromagnetische Kalorimeter, so bildet sich durch die Kombination der beiden Prozesse ein elektromagnetischer Schauer der im Kalorimeter gemessen wird und so eine Bestimmung der Primärenergie des Teilchens ermöglicht.
Ein Kalorimeter setzt sich deshalb zum einen aus Materialien zur Aufschauerung und zum anderen aus Materialien zum Nachweis des elektromagnetischen Schauers zusammen. Die Eigenschaften eines Kalorimeters bzw. die der Materialien, aus denen es aufgebaut ist, werden hauptsächlich durch zwei Parameter – die mittlere Strahlungslänge X_o zur Charakterisierung des Energieverlustes und den Molièreradius R_m zur Charakterisierung der transversalen Ausdehnung des Schauers – beschrieben:

- Die Strahlungslänge X_o ist die mittlere Materialdicke, bei deren Durchquerung ein hochenergetisches Elektron seine ursprüngliche Energie bis auf den Bruchteil $1/e$ auf Grund von Bremsstrahlung verloren hat.

- Der Molièreradius R_m definiert sich als

$$R_m = 21\,\mathrm{MeV} \;\cdot \frac{X_o}{E_c[MeV]} \tag{2.5}$$

  mit der kritischen Energie E_c, bei welcher der Energieverlust der Elektronen durch Ionisation genau gleich groß ist, wie der Energieverlust durch Bremsstrahlung. In einem Radius von 3 R_m wird 99 % der Energie der Elektronen deponiert [Kle 92].

Bei dem Elektromagnetischen Kalorimeter von HERA-B handelt es sich um ein *Sandwichkalorimeter* mit so genannter *Schaschlikauslese*: Lagen aus passivem Material (Absorber) zur Aufschauerung und Lagen aus aktivem Material (Szintillatoren), die durch geladene Teilchen zur Abstrahlung von Licht angeregt werden und so den Schauer nachweisen, wechseln sich ab und sind von mehreren Lichtleitern durchzogen. In Sandwichkalorimetern wird deshalb nur ein Teil der Energie des Schauers nachgewiesen, sie tragen daher auch den Namen „Sampling Kalorimeter“. Die Lichtleiter sammeln das Licht der einzelnen Szintillatorschichten und lenken es auf einen Photoelektronen-Vervielfacher. Sie bestehen aus einem Material, das zum einen das Licht entsprechend gut leitet und zum anderen die Wellenlänge des Lichts in einen Bereich verschiebt, in dem der Photoelektronen-Vervielfacher das Licht effizienter nachweisen kann. Aus der vom Photoelektronen-Vervielfacher gemessenen Ladung kann so die deponierte Energie des Teilchens bestimmt werden. Die Sandwichstruktur ruft eine Stichprobenfluktuation hervor welche die Auflösung des Kalorimeters verschlechtert, sie ermöglicht jedoch eine preiswerte und kompakte Bauweise des Kalorimeters (vgl. Abbildung 2.11).
Das Kalorimeter wird aus 42 mal 56 Modulen der Größe 11,15 cm×11,15 cm aufgebaut. Da die Teilchendichte zum Strahlrohr hin zunimmt, ist es in drei Teile, das *innere*, *mittlere* und das *äußere Kalorimeter* aufgeteilt, die jeweils eine unterschiedliche Granularität

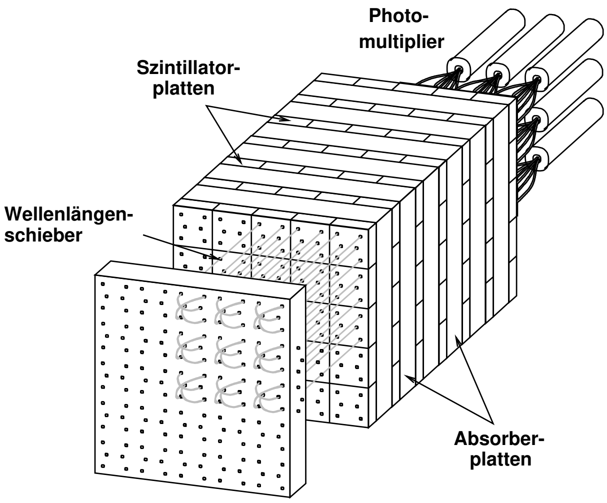


Abbildung 2.11: *Aufbau eines Kalorimetermoduls. Dargestellt ist der schematische Aufbau eines Kalorimetermoduls des inneren Kalorimeters. Man erkennt die Bauweise des Kalorimeters als Sampling-Kalorimeter mit einer Schaschlikauslese und die Aufteilung eines Moduls in* 5×5-*Zellen [Loh 94].*

besitzen: Für das äußere Kalorimeter entspricht ein Kalorimetermodul einer Kalorimeterzelle, für das mittlere Kalorimeter teilt sich jedes Modul in eine 2×2 Matrix von vier Kalorimeterzellen der Größe 5,575 cm×5,575 cm und für das innere Kalorimeter in eine 5×5 Matrix aus 25 Kalorimeterzellen der Größe 2,23 cm×2,23 cm auf (vgl. Abb. 2.12). Um den Schauerüberlapp zu minimieren wird für das innere Kalorimeter als Absorber Wolfram aufgrund des kleinen Molièreradius verwendet. Im mittleren und äußeren Kalorimeter wird dagegen das preisgünstigere Blei als Absorbermaterial verwendet [Tar 96]. Tabelle 2.1 fasst die wichtigsten Kalorimeterdaten der drei Kalorimeterbereiche zusammen.

	Kalorimeter		
	Inneres	*Mittleres*	*Äußeres*
Anzahl der Kanäle	2100	2128	1728
Absorbermaterial	Wolfram	Blei	Blei
Anzahl Zellen pro Modul	25	4	1
Zellgröße	2,24 cm×2,24 cm	5,59 cm×5,59 cm	11,18 cm×11,18 cm
Absorber : Szintillator	2 mm : 1 mm	3 mm : 6 mm	3 mm : 6 mm
Molière Radius	1,42 cm	4,15 cm	4,15 cm
Tiefe	13 cm (23 X_o)	34 cm (20 X_o)	34 cm (20 X_o)
WLS[11] Faser	Kuraray Y-11	BCF - 91A	BCF 91-A
Photoelektronen-Vervielfacher	HAM R5600, FEU-68	FEU-84-3	FEU-84-3

Tabelle 2.1: *Parameter des Elektromagnetischen Kalorimeters (nach [Bob 99]).*

Zur Kalibration des Kalorimeters werden gegenwärtig Photonen des Zerfalls $\pi^o \to \gamma\gamma$ verwendet: Die Signale der einzelnen Zellen werden als die Signale von Photonen des Zerfalls betrachtet und aus der Kombination zweier Zellen die invariante Masse ermittelt.

[11] *Wavelength Shifter* — engl. für Wellenlängerschieber. Material, das die Wellenlänge von elektromagnetischer Strahlung in einen anderen Frequenzbereich verschiebt.

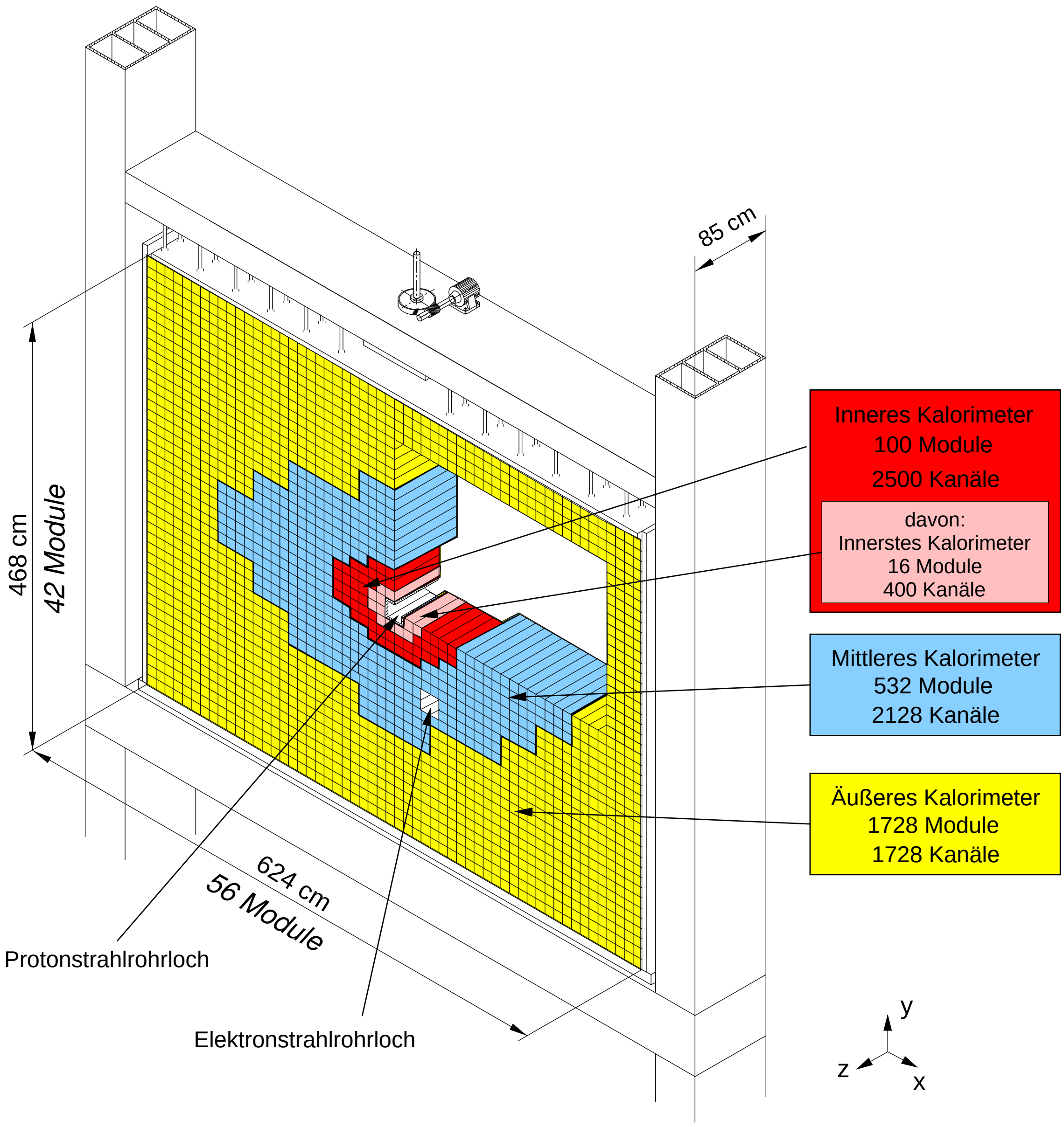


Abbildung 2.12: *Perspektivische Ansicht des Elektromagnetischen Kalorimeters. Man erkennt die Aufteilung des Kalorimeters in die drei Teile inneres, mittleres und äußeres Kalorimeter. Das innere Kalorimeter besitzt in seinem innersten Ring aufgrund der hohen Strahlenbelastung andere Photoelektronen-Vervielfacher.*

Mit Hilfe der Verschiebung des so rekonstruierten Massenpeaks gegenüber der bekannten Masse des Pions kann eine Kalibration der einzelnen Zellen erfolgen.
Zunächst erfolgt eine grobe Kalibration mit einer Genauigkeit von $\approx 15\,\%$: Dazu wird die invariante Masse aus Zellen in einem bestimmten Abstand zum Strahlrohr rekonstruiert und anschließend die anderen Zellen relativ zu den bereits kalibrierten Zellen mittels der Belegungsdichte kalibriert. In einem zweiten Schritt wird diese Kalibration durch Berechnung der invarianten Masse aller möglichen Kombinationen von zwei Clustern verfeinert und so die die Kalibrationskonstanten für die beteiligten Zellen in mehreren Iterationen bestimmt [Igo 00].
Die Genauigkeit dieser Methode hängt stark vom Untergrundanteil ab. Der hohe Unter-

grundanteil kann so viel beitragen, dass kein π^o-Signal mehr sichtbar ist und die Genauigkeit der Kalibration nur abgeschätzt werden kann [Igo 01]. In den Bereichen, in denen ein π^o-Signal rekonstruiert werden kann, wird eine Genauigkeit von 1 bis 5 % erreicht, für Bereiche in denen das Signal nicht rekonstruiert werden kann, wird eine Genauigkeit von 10 % angenommen [Vil 00]. Später soll die Kalibration über das Verhältnis E/p der Energie E zum Impuls p der Elektronen erfolgen.
Die Energie- und Ortsauflösung im Kalorimeter für rekonstruierte elektromagnetische Schauer lässt sich anhand von

$$\frac{\sigma(E)}{E} = \frac{C_1}{\sqrt{E}} \oplus C_2 \tag{2.6}$$

und

$$\sigma_{x,y}[\mathrm{cm}] = \frac{D_1}{\sqrt{E}} \oplus D_2 \tag{2.7}$$

parametrisieren. Tabelle 2.2 fasst die angestrebten Werte der Konstanten C_1, C_2, D_1 und D_2 zusammen.

Kalorimeterbereich	C_1 ($\mathrm{GeV}^{1/2}$) (%)	C_2 (%)	D_1 ($\mathrm{GeV}^{1/2} \cdot \mathrm{cm}$)	D_2 (cm)
Inneres	17	1,6	1,1	0,16
Mittleres	9,5	1,0	1,9	0,20
Äußeres	9,5	1,0	2,2	0,66

Tabelle 2.2: *Energie- und Ortsauflösung des Kalorimeters [Zoc 00].*

2.5.3 Der Übergangsstrahlungsdetektor (TRD)

Um Elektronen in der strahlrohrnahen Region mit hoher Spurdichte zu identifizieren befindet sich unmittelbar vor dem Elektromagnetischen Kalorimeter (vgl. Abschn. 2.5.2 und Abbildung 2.1) in Strahlrohrnähe ein Übergangsstrahlungsdetektor (TRD).
Passieren geladenen Teilchen die Grenzfläche zweier Medien unterschiedlicher Dielektrizitätskonstanten, so senden sie die so genannte Übergangsstrahlung aus, deren Gesamtenergie mit dem Lorentzfaktor $\gamma = \frac{E}{mc^2}$ steigt [Kle 92]. Experimentell wird dieser Übergang durch den Einbau von Schaumstoffen oder dünnen Folien realisiert. Die erzeugte Strahlung ist auf einen Kegel mit dem Öffnungswinkel $1/\gamma$ konzentriert und liegt im Röntgenbereich zwischen 5 und 15 keV [Loh 94]. Da Elektronen eine sehr geringe Masse besitzen, erzeugen sie wesentlich mehr Übergangsstrahlung als Pionen oder andere, noch schwerere Hadronen und können so von diesen unterschieden werden.
Bei HERA-B besteht der Übergangsstrahlungsdetektor aus vier Blöcken mit jeweils 18 alternierenden Radiatorschichten und Detektorschichten. Als Radiatorschichten werden Polypropylenfasern verwendet – der Nachweis erfolgt mittels mit Kaptonfolie beschichteten Proportionalzählrohren [Sav 98].
Mit Hilfe des Übergangsstrahlungsdetektors wird eine Nachweiseffizienz von 95 % und eine Unterdrückung von Hadronen um einen Faktor 10^{-2} angestrebt, sodass sowohl die Leptonmarkierung als auch die J/ψ-Rekonstruktion des Zerfalls $J/\psi \to e^+e^-$ davon profitieren [Sav 98]. Übergangsstrahlung kann bei HERA-B für Teilchen mit einem Lorentzfaktor $\gamma \geq 2000$ nachgewiesen werden – dies entspricht einer Elektronenergie von

$E_e \geq 1\,\text{GeV}$ und einer Pionenergie von $E_\pi \geq 280\,\text{GeV}$ [Wag 99]. Für die Datennahme 2000 wurde der TRD noch nicht verwendet.

2.5.4 Das Myonkammersystem (MUON)

Zur Identifikation der Myonen und zur Bereitstellung eines Signales des Myon Pretrigger Systems (vgl. Abschn. 3.4.2) für die erste Triggerstufe (vgl. Abschn. 3.5) befindet sich ca. 15 m strahlabwärts das Myonspurkammersystem. Es besteht aus vier Spurkammersuperlagen, wobei sich zwischen den ersten drei Spurkammerlagen ca. 1 m dicke Absorberlagen aus Eisen und Beton befinden (Abbildung 2.13). Myonen sind aufgrund ihres im Vergleich zu anderen Teilchen deutlich geringeren Energieverlustes in der Lage, die Absorberplatten zu durchdringen – alle andere Sorten von Teilchen, insbesondere Hadronen, werden in den Absorberschichten absorbiert. Die untere Nachweisschwelle liegt aufgrund der Absorber bei einem Impuls von 4,5 GeV/c für Myonen. Die geometrische Akzeptanz beträgt für Myonen des Zerfalls $J/\psi \rightarrow \mu^+\mu^-$ 71,5 %, der Unterdrückungsfaktor von Hadronen liegt bei ungefähr 100 [Loh 94].

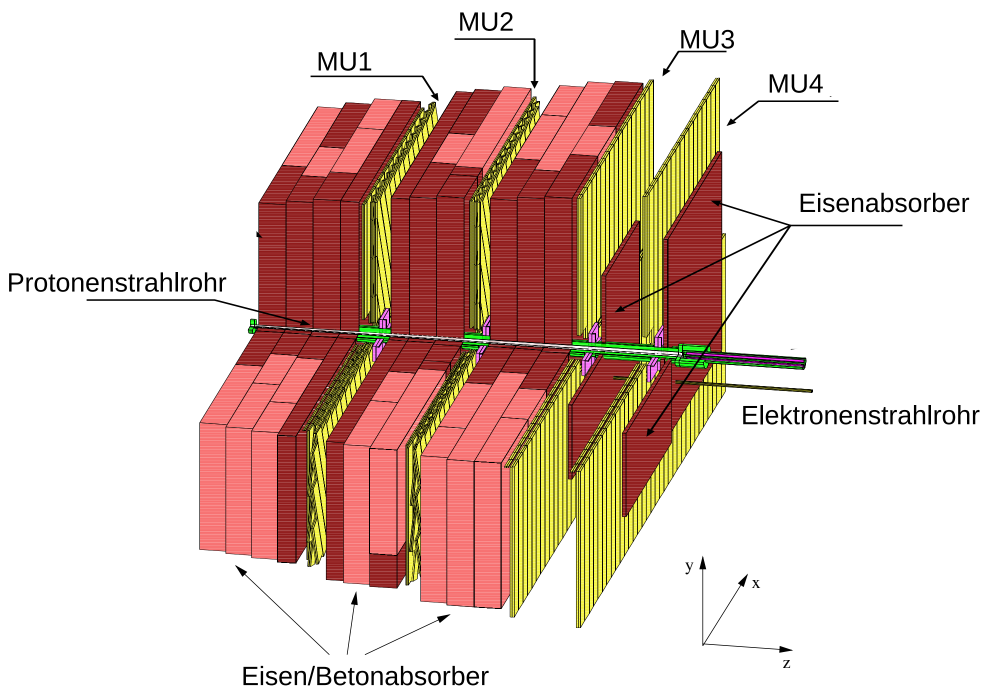


Abbildung 2.13: *Perspektivische Ansicht des Myonsystems. Dargestellt sind die vier Spurkammerlagen MU1-4 sowie die drei dazwischen liegenden Absorber aus Eisen und Beton.*

Die ersten beiden Superlagen bestehen aus drei Einzellagen mit den Stereowinkeln 0^o sowie $\pm 20^o$ (relativ zur y-Achse) und sind aus Proportionalkammern aufgebaut. Proportionalkammern arbeiten ähnlich wie Driftkammern – es werden jedoch keine Driftzeiten gemessen. Die dritte und vierte Superlage bestehen jeweils aus einer einzigen Doppellage Driftröhren.
Der Myon Pretrigger verwendet die beiden Superlagen MU3 und MU4 zur Spursuche. Um neben der x auch die y-Position ohne Rekonstruktion direkt auslesen zu können, sind die

Driftkammern dieser zusätzlich mit quadratischen Kathodenflächen, so genannten Pads (der Größe $6,5\,\mathrm{cm} \times 6,4\,\mathrm{cm}$ und $12,9\,\mathrm{cm} \times 13,0\,\mathrm{cm}$ je nach Superlage), ausgestattet (vgl. Abbildung 2.14).

Ähnlich wie im restlichen Spurkammersystem sind auch bei allen vier Myonkammern die zentralen strahlnahen Bereiche der Superlagen mit einem feineren Spurkammersystem ausgestattet, den so genannten Draht-Pixel-Kammern. Draht-Pixel-Kammern bestehen aus kleinen, quadratischen Zellen, in denen sich parallel zur Strahlrichtung kurze Anoden- und Kathodendrähte befinden. Durchquert ein Teilchen eine solche Zelle, so ergeben die auf den Drähten erzeugten Signale ein zweidimensionales Bild des Teilchendurchgangs, senkrecht zum Strahl.

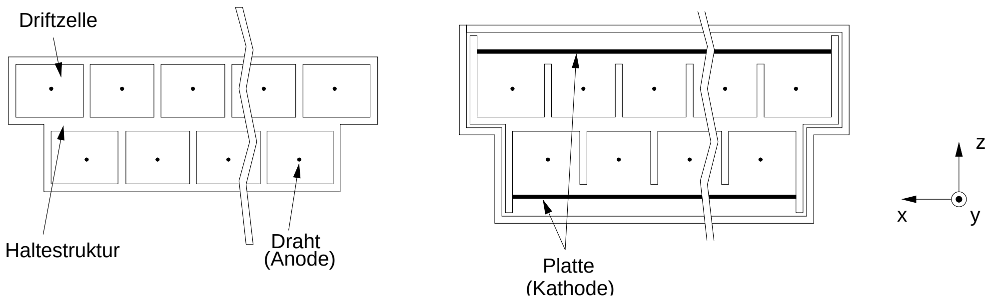


Abbildung 2.14: *Querschnitt durch die Driftröhrenmodule für das Myonkammersystem – links ohne zusätzliche Kathodenflächen, rechts mit Kathodenflächen, die eine direkte Bestimmung der x- und y-Ortsinformation für den Myon Pretrigger ermöglichen (nach [Loh 94]).*

2.5.5 Triggerspurkammersystem für Teilchen mit hohem Transversalimpuls (High P_T)

Zur Auswahl von Ereignissen mit Teilchen hohen Transversalimpuls sind im Magnetfeld drei Lagen aus Spurkammern, die so genannten High-P_T-Spurkammern eingebaut. Die Kammern bestehen aus Driftröhren mit Kathodenflächen, wobei die Kathodenflächen wie beim Myonsystem die zweidimensionale Trefferinformation direkt ohne zusätzlich notwendige Rekonstruktion liefern. Im strahlrohrnahen Bereich werden Gas-Pixel-Detektoren eingesetzt, die eine höhere Granularität besitzen. Die Kammern sind so in Koinzidenz geschaltet, das Teilchen mit einem Transversalimpuls $p_t > 1,5\,\mathrm{GeV}/c$ ein Signal in dem High-P_T-Pretrigger System produzieren.

Das High-P_T-System ermöglicht so den Nachweis des Zerfalls $B^o \rightarrow \pi^+\pi^-$. Studien [Ful 98] haben gezeigt, dass für diesen Kanal eine Effizienz von 25 % erreicht werden kann. Für die Datennahme 2000 wurden diese Spurkammern noch nicht verwendet.

Kapitel 3

Das Trigger und Datennahme System

Nachdem im letzten Kapitel der HERA-B Detektor vorgestellt wurde, soll in diesem Kapitel das HERA-B Datennahme und Trigger System vorgestellt werden. Wie in der Einleitung erwähnt, erfordert das Verhältnis des Wirkungsquerschnittes von inelastischen Untergrundereignissen zum Wirkungsquerschnitt von $b\bar{b}$-Ereignissen von ungefähr 10^{-6} zusammen mit dem sehr kleinen Verzweigungsverhältnis des goldenen Zerfalls von ungefähr 10^{-5}, zusammen mit den bei hadronischen Wechselwirkungen im Vergleich zu e^+e^--Experimenten wesentlich größeren Zahl an Untergrundspuren (vgl. Abbildung 1), ein sehr effizientes Trigger System und ein sehr leistungsfähiges Datennahme System.
Die Triggerentscheidung wird hierbei nur mittels eines eingeschränkten Datensatzes getroffen, während die komplette Information für die Zeit der Triggerentscheidung zwischengespeichert wird. Die Anforderungen sind im einzelnen:

- Reduktion der primären Datenrate um sechs Größenordnungen zur effektiven Filterung der physikalisch interessanten Ereignisse
- möglichst totzeitfreie Datennahme zur Durchführung einer effizienten Messung
- hochselektives, schnelles Trigger System, welches eine Entscheidungsfindung mittels eines reduzierten Datensatzes erlaubt
- möglichst hohe Effizienz bezüglich der Auswahl von B Ereignissen, insbesondere für die Zerfälle des goldenen Kanals
- Verarbeitung, Speicherung und Weiterleitung einer – aufgrund der hohen Zahl von Auslesekanälen – sehr großen Datenmenge von bis zu 5 TByte/s in den Auslesesystemen und Zwischenspeichern des Experimentes

In diesem Kapitel wird zunächst die generelle Triggerstrategie vorgestellt und ein Überblick über das vierstufige Trigger System gegeben. Anschließend werden die einzelnen Triggerstufen im Detail vorgestellt, wobei auf die erste Triggerstufe vertieft eingegangen wird. Auf das ECAL Pretrigger System, das einen der Ausgangspunkte des Trigger Systems darstellt und Inhalt dieser Arbeit ist, wird hier nur insoweit eingegangen, wie es für das Verständnis der weiteren Triggerstufen notwendig ist. Die detaillierte Darstellung erfolgt im nächsten Kapitel.

3.1 Die Triggerstrategie

Die klare Signatur der physikalisch interessanten Ereignisse – der goldenen Zerfälle $B \to J/\psi\ K_s^o$ und der Zerfälle des J/ψ-Mesons in zwei Leptonen l^+l^- – bestimmt die Triggerstrategie und ermöglicht ein schnelles Trigger System [Sch 00]:

- *Das b-Quark ist deutlich schwerer als Quarks der ersten und zweiten Generation*

  Die Zerfallsteilchen der B-Mesonen besitzen aufgrund der hohen Masse der b-Quarks und ihrer Impulsverteilung relativ zur Protonstrahlrichtung einen wesentlich höheren mittleren Transversalimpuls als Spuren der Tochterteilchen von leichten Quarks. Zusätzlich zerfallen B-Mesonen hauptsächlich in wenige, leichte Tochterteilchen, die Spuren mit einem hohen Impuls und somit eine geringe Krümmung im Magnetfeld aufweisen.

- *Die Lebensdauer τ_B der B-Mesonen beträgt ca. 1,5 ps*

  Der Zerfall eines B-Mesons durch den Übergang eines b- in ein c-Quark erfolgt hauptsächlich in D-Mesonen. Die Lebensdauer des B-Mesons ist dabei so groß, dass die Sekundärvertices örtlich vom Primärvertex separiert sind. Die Zerfallslänge des B-Mesons, also der mittlere Abstand $b = \beta\gamma c\tau_B$, auch Impaktparameter genannt, beträgt etwa 13 mm. Damit besitzen die Tochterteilchen einen messbaren Impaktparameter b (vgl. Abb. 3.1).

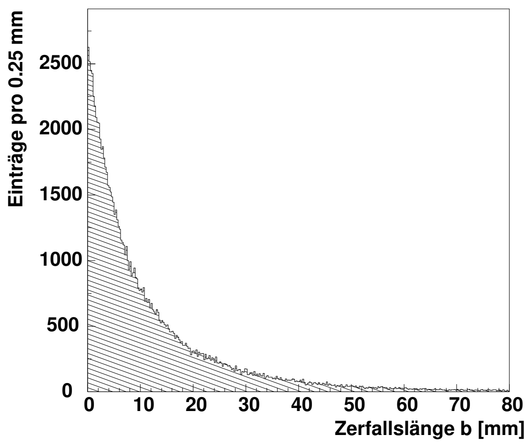


Abbildung 3.1: *Zerfallslängen-Verteilung b von B^o-Mesonen aus MC Ereignissen [Wag 99].*

- *Geladene Leptonen mit hoher Energie können gut in den hadronischen Proton-Nukleon-Reaktionen identifiziert werden*

  Elektronen erzeugen einen charakteristischen elektromagnetischen Schauer im Kalorimeter und können so im hadronischen Untergrund erkannt werden, Myonen besitzen durch ihre Fähigkeit, mehrere Meter dicke Absorber durchqueren zu können, eine klare Spursignatur im Myonspurkammersystem.

- *Charakteristische invariante Masse der Zerfallsteilchen*

  Sowohl die invariante Masse der Kombination zweier entgegengesetzt geladener Leptonen, l^+ und l^-, die vergleichbar mit der J/ψ-Masse (3,1 GeV) sein muss, als auch die invariante Masse der Kombination des K_s^o mit dem J/ψ-Meson die vergleichbar mit der B-Masse (5,3 GeV) sein muss, können zur Selektion der Zerfälle $J/\psi \to l^+l^-$ bzw. $B \to h^+h^-$ verwendet werden.

Der Zerfall des J/ψ in zwei Leptonen l^+l^- zeichnet sich also durch eine klare Signatur aus, bei der beide Leptonen nachgewiesen werden müssen. Für den Elektronenzerfallskanal erfolgt der Nachweis durch einen elektromagnetischen Schauer im Kalorimeter, für den Myonkanal durch Spursegmente im Myonspursystem. Diese lokalisierten Signale bilden das Pretriggersignal und definieren den Startsuchbereich für die Spursuche im Spurkammersystem. Die Bedingung, dass die Teilchen näherungsweise vom Target kommen müssen, ermöglicht durch die Messung der Ablenkung der Teilchenspur im Magnetfeld eine Impulsmessung und so die Berechnung der invarianten Masse zweier Spuren gleichen Flavors und ungleichnamiger Ladung. Die Triggerentscheidung erfolgt dann aufgrund der invarianten Masse m, die kompatibel mit der J/ψ-Masse sein muss (z. B. $m \geq 2,0$ GeV). Damit erhält man einen Zugang zu $b\bar{b}$-Ereignissen, bei denen ein B-Meson via

$$B \to J/\psi(\to l^+l^-)X \tag{3.1}$$

zerfällt. Das Verzweigungsverhältnis für diesen Zerfall beträgt ungefähr ein Prozent. Gleichzeitig ist es mittels dieser Art der Triggerentscheidung möglich, auf direkt produzierte J/ψ und χ-Zustände zu triggern. Der Zerfallskanal

$$B \to \pi^+\pi^- \tag{3.2}$$

zur Messung des Winkels α des Unitaritätsdreiecks (vgl. Abbildung 1.2) kann ebenfalls durch Auswahl von Ereignissen mit großer invarianter Masse erfolgen. Statt auf zwei Leptonen müssen für diese Art von Ereignissen zwei Pionen mit entsprechend höherer invarianter Masse nachgewiesen werden. Auf die gleiche Weise kann auch auf Zerfälle der Art

$$\Upsilon \to l^+l^- \tag{3.3}$$

getriggert werden.
Durch einen generellen *Dilepton*-Trigger, der nach zwei Leptonen beliebigen Flavors sucht und Schnitte auf den Transversalimpuls der Leptonen sowie auf den Impaktparameter des Sekundärvertex macht, ist ein weites Fenster der B-Physik zugänglich.
Die Implementierung solcher Trigger benötigt zunächst die Rekonstruktion von Lepton- und Hadronspuren aus den Ereignisdaten. Mit Hilfe von entsprechenden Triggerkriterien kann dann eine Auswahl von Spuren mit hohem Transversalimpuls erfolgen, die eine höhere Wahrscheinlichkeit besitzen, von B-Zerfällen zu stammen.

3.2 Das Trigger System im Überblick

Für die Auswahl von Ereignissen würde man im Idealfall den gesamten Datensatz eines Ereignisses auf einmal zur Ereignisselektion verwenden – dies ist jedoch bei der bei HERA-B anfallenden Datenmenge und Datenrate nicht möglich. Stattdessen wurde das Trigger System in vier größtenteils unabhängig implementierte Systeme aufgeteilt, die jeweils die Selektion der Ereignisse nacheinander durchführen und je nach Stufe unterschiedlich viel Detektorinformationen verwenden: Wird ein Ereignis auf der n-ten Triggerstufe akzeptiert, so werden die Daten an die $n+1$-te Stufe weitergeleitet und dort bearbeitet. Die zu verarbeitende Rate an Ereignissen nimmt so von Triggerstufe zu Triggerstufe ab. Gleichzeitig nimmt die Zeit, die für die Triggerentscheidung zur Verfügung

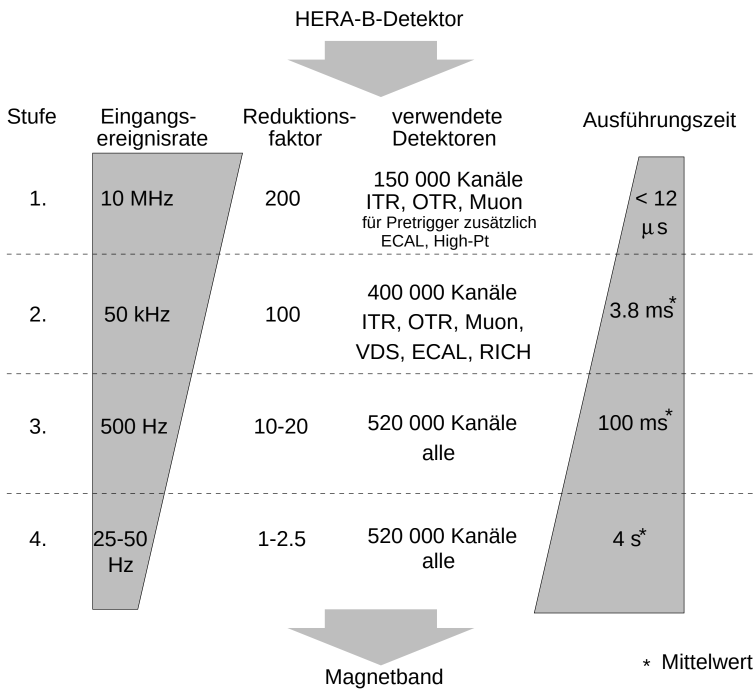


Abbildung 3.2: *Schematische Darstellung des Designs des vierstufigen Trigger Systems: Die Triggerstufen führen parallel zur Datennahme eine Selektion der Detektordaten durch, bevor die Daten auf Band gespeichert werden. Die Eingangsrate nimmt von Triggerstufe zu Triggerstufe aufgrund der Selektion der Ereignisse ab, während die Zeit, die den einzelnen Triggerstufen zur Ereignisselektion zur Verfügung steht, von Stufe zu Stufe zunimmt (nach [Wag 00]).*

steht, und der Anteil der Detektorinformationen, die zur Triggerentscheidung verwendet werden, und damit die Komplexität zu.

Der *Reduktionsfaktor*, der sich aus der Verkleinerung der Datenrate und damit aus der Unterdrückung von Untergrundereignissen ergibt, und die *Effizienz* der Auswahl der gesuchten Signalereignisse, können im Allgemeinen nicht beide gleichzeitig maximiert werden. Jede Triggerstufe stellt vielmehr einen Kompromiss in der Optimierung beider Werte unter Berücksichtigung der physikalischen Zielsetzung, der technischen Realisierbarkeit und der finanziellen Machbarkeit dar. So ergibt sich z. B. die Ausgangsrate, und damit die notwendige Reduktion der n-ten Stufe, aus der maximal möglichen Eingangsrate der $n+1$-ten Stufe. Alle Triggerstufen zusammen müssen in der Lage sein, die Ereignisrate und Datenmenge so zu reduzieren, dass eine sinnvolle Speicherung und Weiterverarbeitung der Daten möglich ist.

Abb. 3.2 gibt einen Überblick über die vier Triggerstufen, ihre Reduktionsfaktoren, Eingangsraten und Ausführungszeiten. Grundsätzlich wird versucht, möglichst frühzeitig, also bereits in der ersten Triggerstufe, die größte Reduktion zu erreichen. Da diese Stufe gleichzeitig auch die höchste Eingangsrate bearbeiten muss, wird auf dieser Stufe speziell entwickelte Hardware verwendet und nur ein Teil der Daten für die Untersuchung und Triggerentscheidung verwendet. Ab der zweiten Triggerstufe ist die Datenrate soweit reduziert und die Entscheidungungszeit so groß, dass hier standardisierte Hardware zur Verfügung steht und eine größere bis hin zur gesamten Datenmenge des Detektors zur Auswahl der Ereignisse verwendet wird. Die Eingangsstufe und die vier Triggerstufen von HERA-B sind:

- *Pretrigger*

  Drei separate Pretrigger Systeme – jeweils eines für Elektronen, eines für Myonen und eines für Hadronen mit hohem Transversalimpuls – sind vollständig mittels spezialisierter Hardware aufgebaut und arbeiten auf der vollen Eingangsrate von 10,4 MHz. Sie liefern der ersten Triggerstufe Spurkandidaten für die dortige Spursuche. Da alle drei Pretrigger Systeme im Allgemeinen mehr als einen Spurkandidaten pro BX liefern, findet auf dieser Stufe noch keine Reduktion der Ereignisrate statt. Während der Datennahmeperiode 2000 waren nur die Pretrigger für Myonen und Elektronen implementiert.

- *First Level Trigger (FLT)*

  Die erste Triggerstufe arbeitet auf der vollen BX-Rate von 10,4 MHz (mal der Anzahl an Pretriggerkandidaten) und führt eine Spursuche der Pretriggerspurkandidaten vom Pretrigger System zum Magneten hin durch. Nach erfolgreicher Spurrekonstruktion kombiniert sie die Spuren gleichen Flavors und ungleicher Ladung und führt einen Schnitt auf die invariante Masse der Paare durch. Zusammen mit den Pretrigger Systemen stehen ihr 12,3 μs zur Bearbeitung eines Ereignisses zur Verfügung. Die Triggeralgorithmen sind für die Suche nach J/ψ-Mesonen optimiert, gleichzeitig aber auch frei für andere Triggerszenarien konfigurierbar. Die Logik des FLT ist mittels spezialisierter Hardware, so genannten FPGAs[1], LUTs[2] und ASICs[3], realisiert. Da die zweite Triggerstufe nur eine mittlere Eingangsrate von bis zu 50 kHz bewältigen kann, muss eine Reduktion der Ereignisrate um einen Faktor 200 erreicht werden.

- *Second Level Trigger (SLT)*[4]

  Die maximale Eingangsrate der zweiten Triggerstufe beträgt 50 kHz, wobei Spitzenraten von bis zu 100 kHz tolerabel sind. Die Triggeralgorithmen arbeiten auf einer Farm aus 240 Linux[5] PCs[6]. Der SLT verwendet die Spurinformationen des FLT und verfeinert die Triggerentscheidung durch Verwendung zusätzlicher Detektorinformationen und Erweiterung der Spursuche bis zum Target.

  Der erreichbare Reduktionsfaktor hängt stark von der Art des Triggerschnitts ab: Für die Auswahl von J/ψ-Ereignissen kann die Rate so stark reduziert werden, dass keine weitere Reduktion auf den höheren Stufen notwendig wird, für andere Arten von Ereignissen kann die Eingangsrate um ungefähr den Faktor 100 reduziert werden. Die Bearbeitungszeit beträgt im Mittel 4 ms.

- *Third Level Trigger (TLT)*[7]

  In der dritten Triggerstufe erfolgt die Kombination der gesamten Ereignisdaten und die so genannte *Ereignisbildung*. Auf dieser Stufe können nun auch erstmalig

[1] *Field Programmable Gate Array* — engl. für Programmierbare Logikeinheiten

[2] *LookUpTables* — engl. für Nachschlagetabelle. Technisch ist dies durch Speicherbausteine realisiert.

[3] *Application Specific Integrated Circuit* — engl. für anwendungsspezifischer integrierter Schaltkreis. Allgemein versteht man darunter die Bezeichnung für einen Chip, der für eine ganz spezifische Anwendung konzipiert wurde.

[4] *Second Level Trigger* — engl. für Zweite Auslösestufe

[5] Name eines Betriebssystemes

[6] *Personal Computer* — engl. für Arbeitsplatzrechner

[7] *Third Level Trigger* — engl. für Dritte Auslösestufe

Informationen, die außerhalb der Suchbereiche liegen, für die Triggerentscheidung herangezogen werden, und es kann eine Entscheidung basierend auf dem gesamten Ereignis durchgeführt werden.

Die dritte Triggerstufe ist für physikalische Untersuchungen außerhalb des J/ψ-Bereichs gedacht und arbeitet auf der gleichen PC-Farm wie die zweite Triggerstufe. Sie soll eine Reduktion der Datenrate von etwa 10 erreichen, sodass die Eingangsrate für die vierte Triggerstufe 25 bis 50 Hz beträgt.

Während der Datennahmeperiode 2000 war der TLT noch nicht implementiert.

- *Fourth Level Trigger (4LT)*[8]

  In der vierten Triggerstufe erfolgt die vollständige Rekonstruktion, Klassifikation und Auswahl der Ereignisse. Sie arbeitet auf einer aus 200 Linux-PCs aufgebauten Farm und soll dadurch eine weitere Reduktion der Daten um einen Faktor 2,5 ermöglichen.

Im nächsten Abschnitt wird zunächst das Datennahme System des HERA-B Detektors vorgestellt, bevor in den anschließenden Abschnitten näher auf die einzelnen Triggerstufen eingegangen wird.

3.3 Datennahme System

Die Aufgabe des Datennahme Systems ist die Steuerung des Detektor- und Trigger Systems sowie der Transport der Detektordaten vom Detektor zu den verschiedenen Trigger Systemen und zur Archivierung auf Magnetband. Die Auslese der Detektordaten erfolgt für jedes Bunchcrossing. Abbildung 3.3 gibt einen Überblick über das Datennahme System und den Datenpfad.
Zunächst werden die Daten der knapp 600.000 Detektorkanäle durch die etwa 1400 Boards der *Ausleseelektronik* — auch *Front-End-Elektronik* (FE) genannt – ausgelesen, aufbereitet[9] und in Pipelinespeicher[10] während der Bearbeitung des Ereignisses im First Level Trigger zwischengespeichert. Die Pipelinespeicher sind als ringförmiger Speicher konzipiert, die in der Lage sind, 128 aufeinander folgende Ereignisse zu speichern bevor das 129. Ereignis das erste Ereignis wieder überschreibt. Diese maximale Speichertiefe definiert auch die maximale Latenzzeit, die dem First Level Trigger für seine Bearbeitung des Ereignisses und die Triggerentscheidung zur Verfügung steht: $128 \cdot 96\,\text{ns} = 12,3\,\mu\text{s}$. Nähere Einzelheiten zum Aufbau der detektorspezifischen Auslesesysteme finden sich in [Wag 00]. Das Auslesesystem des Kalorimeters wird im Rahmen der Besprechung des ECAL Pretriggers in Kapitel 4 in Abschnitt 4.2 näher vorgestellt.
Neben der Speicherung der Daten geben die Auslesesysteme des Elektromagnetischen Kalorimeters, des Myonsystems und des High-P_T-Systems die Detektorinformationen über einen vom Hauptdatenpfad separierten Datenpfad an die Pretrigger Systeme weiter.

[8] *Fourth Level Trigger* — engl. für Vierte Auslösestufe

[9] Die Aufbereitung der Daten ist je nach Detektor unterschiedlich: Sie umfasst z. B. die Verstärkung, Digitalisierung oder Pulsformung der Signale.

[10] engl. für Rohrleitung. Für eine detaillierte Beschreibung der Funktionsweise sei auf Abschn. 4.1.3 verwiesen.

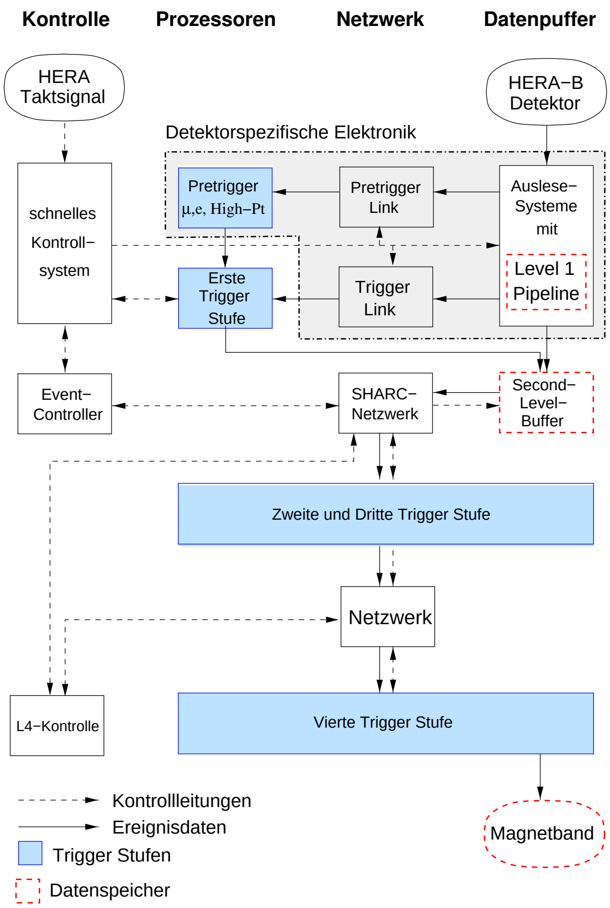


Abbildung 3.3: *Aufbau des Datennahme Systems von HERA-B. Die Detektordaten werden durch die Auslesesysteme der einzelnen Detektorsysteme über getrennte Datenpfade an die Pretrigger Systeme, die erste Triggerstufe und bei Annahme des Ereignisses durch die erste Triggerstufe an die Speicher des SLT, den Second Level Buffer (SLB) gereicht. In einer gemeinsamen PC-Farm erfolgt die Bearbeitung der zweiten und dritten Triggerstufe. Von dort gelangen die Daten über die vierte Triggerstufe zur Speicherung auf Magnetband (nach [Wag 00]).*

Für die von der ersten Triggerstufe für die Spurrekonstruktion verwendeten Detektorsysteme – Teile des inneren und äußeren sowie des Myon Spurkammersystems – erfolgt darüber hinaus über den so genannten *Trigger Link* eine triggergerechte Aufbereitung der Trefferinformationen, wie z. B. die Erzeugung von Bitmustern von angesprochenen Kanälen. Abbildung 3.7 zeigt den Aufbau dieses Auslesezweigs am Beispiel des äußeren Spurkammersystems.

Akzeptiert die erste Triggerstufe ein Ereignis, so werden die Daten aus den Pipelinespeichern der Ausleseelektronik zusammen mit den Informationen der ersten Triggerstufe in die Datenspeicher der zweiten Triggerstufe, den aus SHARCs[11] aufgebauten so genannten Second Level Buffer (SLB)[12], geschrieben. Im Unterschied zu den Pipelinespeichern der Auslesesysteme kann ein Ereignis im Prinzip beliebig lange in diesen Speichern verbleiben – im Mittel jedoch nicht länger als 4,8 ms[13] – und wird erst nach Freigabe des Speicherbereichs überschrieben. Aus diesem Grund besitzen die höheren Triggerstufen (SLT, TLT, 4LT) auch keine fest definierte maximale Latenzzeit.

Über ein Netzwerk aus SHARC[14]-Prozessoren kann nun die aus einer PC-Farm von 240 Linux-PCs bestehende kombinierte zweite und dritte Triggerstufe auf die Ereignisdaten

[11] *Super-Harvard-ArchitectuRe-Computer* – Name eines Digitalen Signal-Prozessors der Firma Analog Devices.

[12] *Second Level Buffer* – Mit SHARCs aufgebautes System von Datenzwischenspeichern, welches die Daten eines Ereignisses während der Ausführung des Second Level Triggers speichert.

[13] Diese Zahl ergibt sich aus der Anzahl verfügbarer PCs (240) und der maximalen mittleren Eingangsrate (50 kHz).

zugreifen. Zunächst fordert ein Prozessor die Detektordaten der von der ersten Triggerstufe definierten Suchbereiche an und bearbeitet die Triggeralgorithmen der zweiten Triggerstufe. Akzeptiert die zweite Triggerstufe das Ereignis, so fordert der Prozessor, der das Ereignis für die zweite Triggerstufe bearbeitet hat, auch die restlichen Daten des Detektors über das SHARC-Netzwerk an, und beginnt dann mit der Bearbeitung der Algorithmen der dritten Triggerstufe. Da jetzt zum ersten Mal das komplette Ereignis zur Analyse verwendet wird, ist eine weitere Speicherung der Daten nicht mehr nötig, und der entsprechende Bereich des SLB wird für die Speicherung weiterer Ereignisse frei gegeben. Der Datenfluss zwischen dem Second Level Buffer und der PC-Farm der zweiten und dritten Triggerstufe wird durch den Event Controller[15] gesteuert. Nähere Einzelheiten zu dem SHARC-Netzwerk und dem Event Controller finden sich in [Wag 00].

Akzeptiert die dritte Triggerstufe das Ereignis, so werden die gesamten Daten des Ereignisses an die vierte Triggerstufe weitergeleitet, die ebenfalls aus einer PC-Farm besteht. Nimmt auch die vierte Triggerstufe das Ereignis an, so werden die Daten über einen zentralen Knoten zunächst auf Festplatte, und anschließend auf Magnetband gespeichert.

Eine besondere Aufgabe kommt dem *Schnellen Kontrollsystem* (FCS)[16] zu, das die Weiterleitung der Daten auf der ersten Triggerstufe kontrolliert, steuert und synchronisiert. Es versorgt dazu die Ausleseelektronik mit einem zum HERA-Taktsignal von 10,4 MHz synchronen Signal. Je nach Ort des Detektorsystems erhält das entsprechende Auslesesystem das Signal zeitverschoben, um die Flugzeiten der Teilchen durch den Detektor zu berücksichtigen.[17] Darüber hinaus sorgt es dafür, dass in der Ausleseelektronik jedem Datensatz eines Ereignisses eine Identifikationsnummer, die so genannte *Bunchcrossing-Nummer* (BX), zugeordnet wird, und somit jedes Ereignis eindeutig charakterisiert wird.

Akzeptiert die erste Triggerstufe ein Ereignis, so löst das schnelle Kontrollsystem die Weitergabe der Daten aus den Pipelinespeichern der Ausleseelektronik an den Second Level Buffer aus, und informiert die zweite Triggerstufe mittels des Event Controller über die Annahme des Ereignisses. Darüber hinaus kann diese Weitergabe auch durch andere Quellen veranlasst werden, um z. B. eine zufällige Auswahl von Ereignissen mittels eines so genannten *Minimum-Bias-Trigger*[18] zu realisieren.

3.4 Die Pretrigger Systeme

Die erste Triggerstufe hat die Aufgabe, Elektronen- und Myonspuren sowie Hadronspuren mit einem hohen Transversalimpuls zu finden. Die für die Spursuche notwendigen Spurkandidaten erhält der FLT von den Pretrigger Systemen. Die Pretrigger Nachrichten enthalten dabei jeweils die Informationen über den Ort, die Richtung und die Teilchensorte der Spurkandidaten. Für jede der drei Teilchensorten existiert ein separates Pretrigger System.

[15] engl. für Ereignis-Kontrolleinheit

[16] *Fast Control System* — engl. für Schnelles Kontrollsystem. Kontrollsystem zur Synchronisation der Auslese der HERA-B Detektoren.

[17] Die Teilchen erreichen z. B. das 13,5 m hinter dem Target liegende Kalorimeter erst ≈ 45 ns nach der primären Wechselwirkung am Target, also etwa erst ein halbes Bunchcrossing später.

[18] Der Name kommt von dem Auswahlkriterium, dass der Trigger die Auswahl der Ereignisse möglichst wenig beeinflussen soll.

3.4.1 Elektronen Pretrigger

Der ECAL Pretrigger besitzt die Aufgabe Elektronspurkandidaten dem First Level Trigger zur Verfügung zu stellen. Er führt dazu eine Clustersuche und -rekonstruktion im Elektromagnetischen Kalorimeter durch und extrapoliert die Spur anhand der rekonstruierten Energie und der Annahme, dass das Teilchen vom Target kommt, in die Superlage TC02 (vgl. Abbildung 2.7). Zur Unterdrückung von Clustern von Untergrundereignissen führt er einen Schnitt auf die Transversalenergie der Cluster durch.
Da die Elektronen während ihres Fluges durch den Detektor Energie in Form von Bremsstrahlung emittieren können, kann der Pretrigger zusätzlich den zugehörigen Bremsstrahlungscluster der vor dem Magneten emittierten Bremsstrahlung rekonstruieren.[19]
Je nach Ladung liegt der Bremsstrahlungscluster aufgrund der Ablenkung im Magneten links bzw. rechts des Leptonclusters. Da zu diesem Zeitpunkt der Rekonstruktion die Ladung des Leptons noch nicht bekannt ist, werden beide möglichen Bremsstrahlungscluster rekonstruiert. Für die Datennahmeperiode 2000 fand diese Rekonstruktion jedoch noch nicht statt.
Der ECAL Pretrigger übergibt dem First Level Trigger die Position und Energie des Clusters, die Energie der beiden Bremsstrahlungscluster sowie das Suchregionsfenster in der Superlage TC02. Eine detaillierte Beschreibung des ECAL Pretriggers folgt in Kapitel 4.

3.4.2 Myon Pretrigger

Der Myon Pretrigger hat die Aufgabe Myon Spurkandidaten im Myonspurkammersystem zu suchen und dem First Level Trigger zur Spursuche zur Verfügung zu stellen. Er sucht dazu nach Trefferkoinzidenzen in den ca. 7800 projektiv angeordneten Pads der beiden letzten Myonspurkammerlagen MU03 und MU04 (vgl. Abb. 2.13).
Im inneren Myonkammersystem werden projektive Treffer in einem Pad der Spurkammerlage MU03 und einem von vier Pads der Spurkammerlage MU04 als Koinzidenzen akzeptiert, im äußeren Myonkammersystem ein Treffer in einem Pad der Spurkammerlage MU03 und in einem von sechs Pads der Lage MU04 (vgl. Abbildung 3.4).
Um die Richtung der Myonkandidaten durch Vielfachstreuung nicht zu verfälschen, befinden sich im Gegensatz zum restlichen Myonsystem zwischen den beiden Spurkammerlagen MU03 und MU04 keine Absorber. Der Myon Pretrigger übergibt die Koordinaten der bis zu 12 cm großen Suchbereiche in der Superlage MU04 an den First Level Trigger. Bei einer Wechselwirkungsrate von 40 MHz stellt der Myon Pretrigger im Mittel einen Spurkandidaten pro BX zur Verfügung [Loh 94].

3.4.3 High-P_T Pretrigger

Zur Auswahl von Hadronen mit hohem Transversalimpuls dient das High-P_T-Pretriggersystem, das die Spurkammer-Informationen des High-P_T-Systems (vgl. Abschnitt 2.5.5) verwendet. Aufgrund der hohen Spurdichte wird eine Dreifach-Koinzidenz der drei Lagen zur Auslösung des Pretriggers gefordert (Abbildung 3.4). Der High-P_T-Pretrigger

[19] Die nach dem Magneten emittierte Bremsstrahlung ist in dem rekonstruierten Cluster enthalten, die im Magneten emittierte Bremsstrahlung ist zum Teil im Leptoncluster enthalten, zum Teil nicht mehr rekonstruierbar. Eine detaillierte Beschreibung erfolgt im Rahmen der Beschreibung der Bremsstrahlungskorrektur des ECAL Pretriggers in Abschnitt 4.3.8.

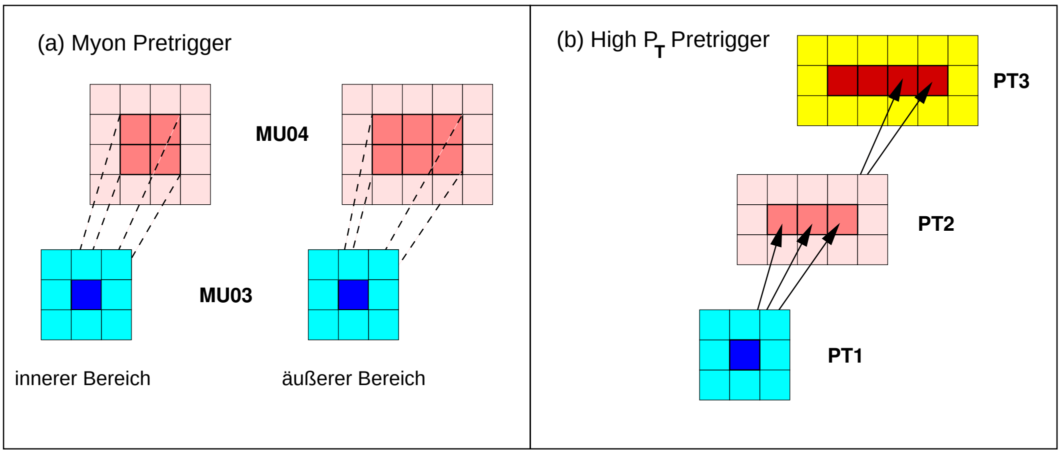


Abbildung 3.4: *Myon und High-P_T Pretrigger Koinzidenzschema. (a) Für den Myon Pretrigger wird eine Koinzidenz aus einem Pad der Superlage MU03 und einem von vier Pads (für den inneren Bereich) bzw. einen von sechs Pads (für den äußeren Bereich) der Superlage MU04 gebildet. (b) Für den High-P_T Pretrigger besteht eine Koinzidenz aus einer so genannten 1-3-2 Pad Koinzidenz der drei Superlagen.*

übergibt dem First Level Trigger die Parameter der gefundenen Spurkoinzidenzen. Die untere P_T-Nachweisgrenze des Pretrigger Systems liegt bei 1,5 GeV für die Hadronspuren. Simulationen haben gezeigt, dass mit ungefähr 2,2 Ereignissen pro BX bei einer Wechselwirkungsrate von 40 MHz zu rechnen ist [Med 95].

3.5 Der First Level Trigger (FLT)

Die erste Trigger Stufe, der so genannte First Level Trigger (FLT), ist auf den Nachweis des Zerfalls $J/\psi \to l^+l^-$ optimiert. Dazu werden die von den Pretrigger Systemen gefundenen Spurkandidaten ausgehend von der Spurkammerlage des Pretrigger Systems durch das Spurkammersystem hinter dem Magneten zum Target hin zurückverfolgt und die kinematischen Parameter der Spuren rekonstruiert. Die programmierbare Triggerentscheidung basiert auf der Anzahl, Art und Ladung der Spuren sowie der invarianten Masse von Spurpaaren. Der FLT verarbeitet dazu neben den Pretriggerinformationen die Trefferinformationen von etwa 150.000 Spurkammerkanälen und soll die Eingangsrate von 10,4 MHz um einen Faktor 200 reduzieren.

3.5.1 Konzept des First Level Triggers

Zur Realisierung werden folgende Konzepte verwendet:

- *Nachrichtenbasierte Spursuche und Spurrekonstruktion*

  Die Spursuche, Spurrekonstruktion und Triggerentscheidung erfolgt nachrichtenbasiert, d. h. jeder möglichen Spur wird eine 80-Bit Spurnachricht zugeordnet, die Informationen wie die Richtung der Spur, Suchbereiche, Teilchensorte und BX Nummer sowie nach der Spurrekonstruktion die Impulsparameter enthält. Diese Nachricht wird ausgehend von den Pretrigger Systemen, in denen sie bei Aufspürung eines Spurkandidatens erzeugt wird, von Prozessoreinheit zu Prozessoreinheit gereicht und in jeder Prozessoreinheit aktualisiert. Dabei ist jede Prozessoreinheit, wie im Falle der TFUs[20], einem bestimmten Spurkammerbereich, oder wie im Falle der TPU[21] einem bestimmten Spurbereich zugeordnet. Die Bearbeitung der Nachrichten eines Ereignisses erfolgt asynchron. Jede Prozessoreinheit kann Nachrichten von verschiedenen Ereignissen parallel bearbeiten.

- *Berechnungen mittels Lookuptables und Pipeline Architektur*

  Aufgrund der begrenzten Zeit, die dem FLT zur Verfügung steht, werden alle Berechnungen mittels einer so genannten Pipeline-Architektur und Lookuptables durchgeführt: *Lookuptables* sind Speicherbausteine, die mit jedem gewünschten Inhalt gefüllt werden können und ähnlich wie eine Tabelle anhand eines Satzes von Eingangsdaten die dazugehörigen Ausgangsdaten. Da keine Berechnung sondern nur eine Auslese von Daten erfolgt sind Lookuptables wesentlich schneller als Berechnungen. Durch Verwendung von *P*ipeline-Architekturen wird die Bestimmung der Ergebnisse von verschiedenen Nachrichten zudem parallelisiert: Die Bestimmung der Ergebnisse wird in mehrere Schritte aufgeteilt: Während die $n+1$-te-Stufe die Bestimmung des k-ten Teilergebnisses einer Nachricht durchführt, führt die n-te Stufe bereits die Bestimmung des $k-1$-ten Teilergebnisses der nächsten Nachricht durch (vgl. auch Abschnitt 4.1.3).

- *Spursuche mittels einem Kalmanfilter nachempfundenen Spursuchalgorithmus*

  Zur Spursuche verwendet der FLT einen von dem Kalmanfilter [Kal 60, Kal 61, Bat 62] adaptierten Spursuchalgorithmus: Zur Extrapolation der Spur in die nächste Spurkammerlage werden neben dem kinematischen Bereich, in dem die Spur sich befinden kann, insbesondere auch die bereits für diese Spur gefundenen Treffer in den anderen Spurkammerlagen berücksichtigt, sodass die Spurinformationen durch Hinzufügen der neu gefundenen Treffer schrittweise verbessert wird. Abbildung 3.5 zeigt den zeitlichen Ablauf der verschiedenen Stufen der Extrapolation.

- *Verwendung spezialisierter Elektronik zur Datenbearbeitung*

  Sämtliche Logik des First Level Trigger ist mit Hilfe von spezialisierter Hardware unter Verwendung von FPGAs, LUTs und ASICs realisiert. Die drei Bereiche Spursuche, Spurrekonstruktion und Triggerentscheidung sind jeweils als separate Elektronikeinheiten umgesetzt worden.

3.5.2 Genereller Aufbau des First Level Triggers

Der First Level Trigger teilt sich in drei Bereiche auf: Ein Netzwerk von Spursucheinheiten (TFU) führt zunächst eine iterative Spursuche ausgehend von den Pretriggerdetektorlagen bis zu der Superlage PC01 hin aus. Für die gefundenen Spuren werden anschließend in den Spurparametereinheiten (TPU) die kinematischen Parameter wie Impuls und Ladung unter der Annahme, dass das zugehörige Teilchen vom Target kam, berechnet. In der Triggerentscheidungseinheit (TDU)[22] werden die Spuren kombiniert

[20] *Track Finding Units* — engl. für Spursucheinheit
[21] *Track Parameter Unit* — engl. für Spur Parameter Einheit
[22] *Trigger Decision Unit* — engl. für Triggerentscheidungseinheit

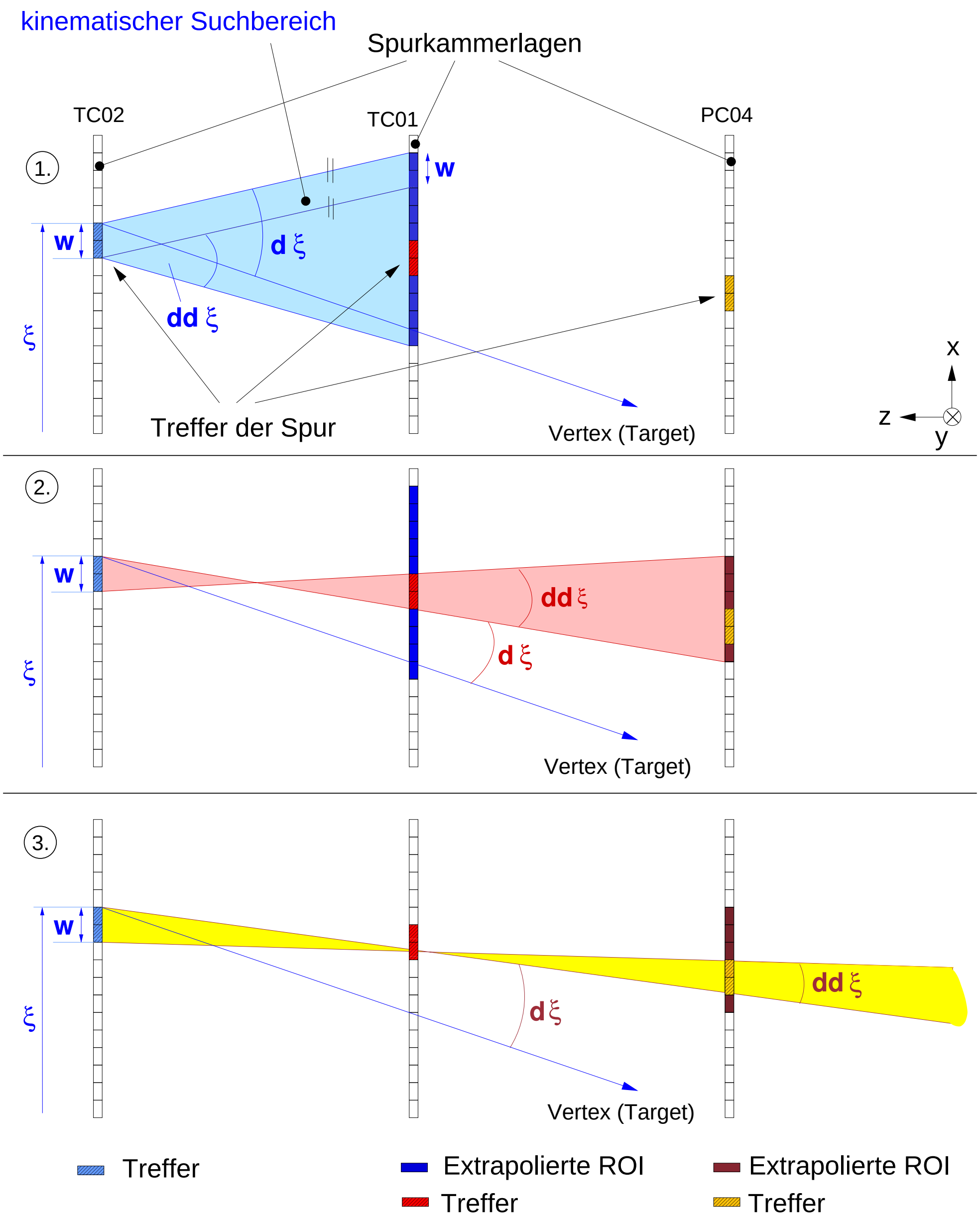


Abbildung 3.5: *Spursuche im First Level Trigger mittels eines von dem Kalmanfilter adaptierten Spurfindungsalgorithmus. Schematisch dargestellt ist der zeitliche Ablauf der Extrapolationen von Superlage zu Superlage unter Verwendung der bereits bekannten Trefferinformationen und damit die schrittweise Verfeinerung der Spurparameter. Die Variablen ξ, $d\xi$, $dd\xi$ und w kodieren die Suchbereiche für den First Level Trigger.*

und es erfolgt die Triggerentscheidung. Abbildung 3.6 zeigt den generellen Aufbau des First Level Triggers mit dem TFU-Netzwerk und den Spurkammerlagen, die für die Spursuche verwendet werden.

3.5.3 Track Finding Unit (TFU)

Jede TFU ist für die Spursuche einem bestimmten Spurkammerbereich in einer Superlage zugeordnet. Sie erhält von diesem Bereich die Trefferinformationen der Ereignisse synchron zur BX-Rate und speichert die Trefferinformationen in einem 128 Ereignis tie-

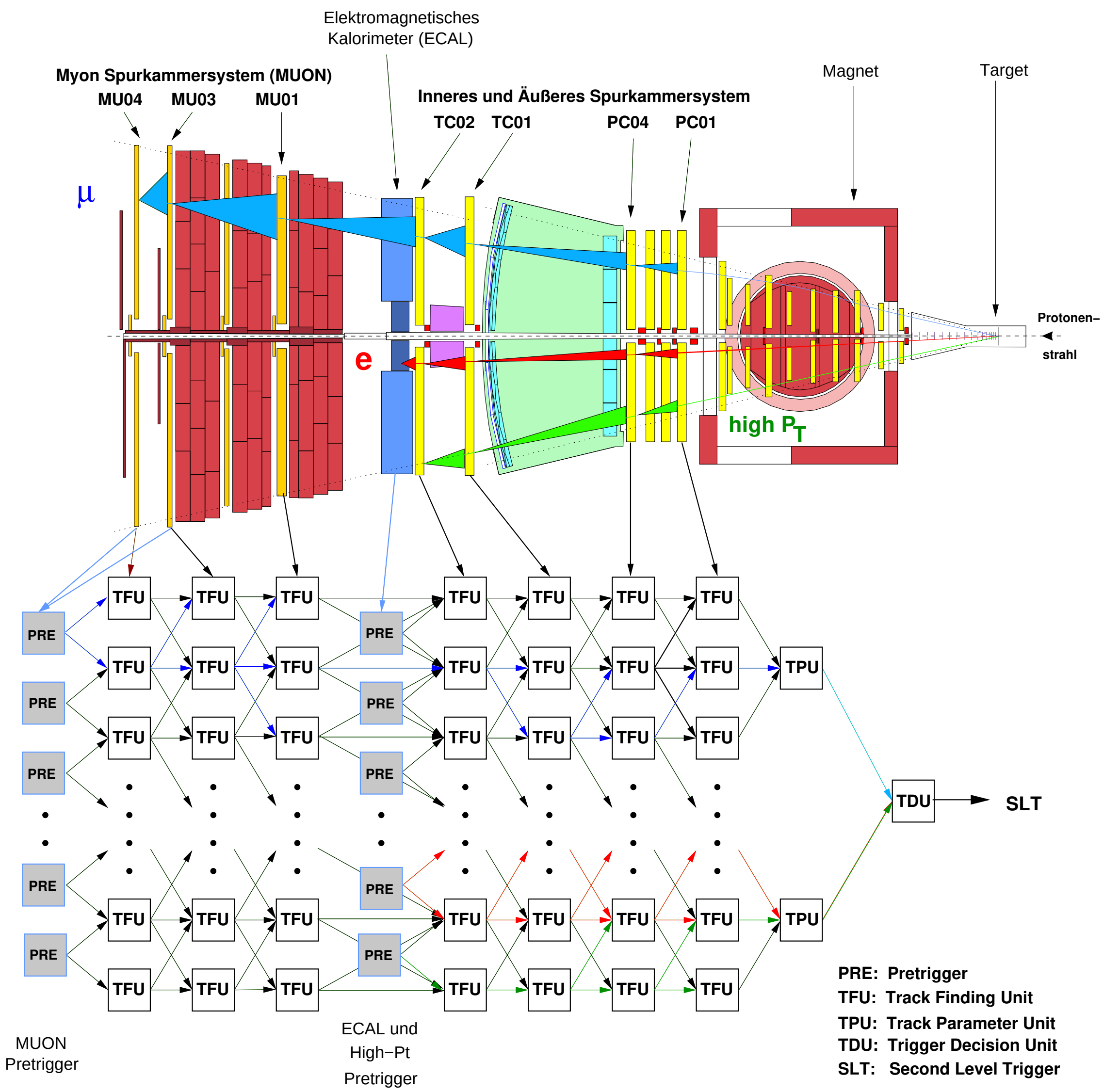


Abbildung 3.6: *Aufbau der ersten Triggerstufe. Ein Netzwerk von Track Finding Units (TFU) empfängt die Nachrichten der drei Pretrigger Systeme und sucht nach Spuren im inneren und äußeren Spurkammersystem sowie im Myon Spurkammersystem. Von den gefundenen Spuren werden in der Track Parameter Unit (TPU) die kinematischen Variablen rekonstruiert und an die Trigger Decision Unit (TDU) weitergereicht, die über die Annahme des Ereignisses entscheidet.*

fen Speicher, dem so genannten Drahtspeicher (WIM)[23]. Jede TFU ist so in der Lage die Spuren der letzten 128 Ereignisse zu bearbeiten. Je zehn TFUs decken die Superlagen PC01 und PC04 ab, je 16 TFUs die Superlagen TC01 und TC02, neun die Superlage MU01 und je vier die Myonsuperlagen MU03 und MU04 (vgl. Abbildung 3.6).
Zur Spursuche erhält die TFU von den Pretrigger Systemen oder von der (weiter vom Target entfernt liegenden) vorhergehenden Superlage die Informationen der Spuren als so genannte Spurnachricht: Dazu gehören neben der Definition der Suchbereiche der Spuren (ROI)[24], die die TFU auf Treffer untersuchen soll, auch noch weitere Informationen wie

[23] *WIre Memory* — engl. für Drahtspeicher
[24] *Region of Interest* — engl. für Suchbereiche

z. B. die Art des Teilchens und die BX-Nummer. Für diese BX-Nummer untersucht die TFU mit Hilfe ihres Drahtspeichers die spezifizierten Suchregionen auf Koinzidenzen von Treffern in allen drei Stereowinkeln der Superlagen. Findet sie keine entsprechende Koinzidenz, so wird die Nachricht nicht weitergeleitet und die Spursuche für diese Spur abgebrochen. Findet sie dagegen eine Koinzidenz, so extrapoliert die TFU die Spur unter Verwendung der bereits gefundenen Treffer und unter der Annahme, dass die Spur vom Target kommt, in die nächste, dem Target näher liegende Superlage. Nach Berechnung des Suchbereichs in dieser nächsten Superlage, aktualisiert die TFU die Spurparameter und übergibt die Nachricht an die entsprechenden TFUs, die dem neuen Suchbereich zugeordnet sind (Abbildung 3.7).

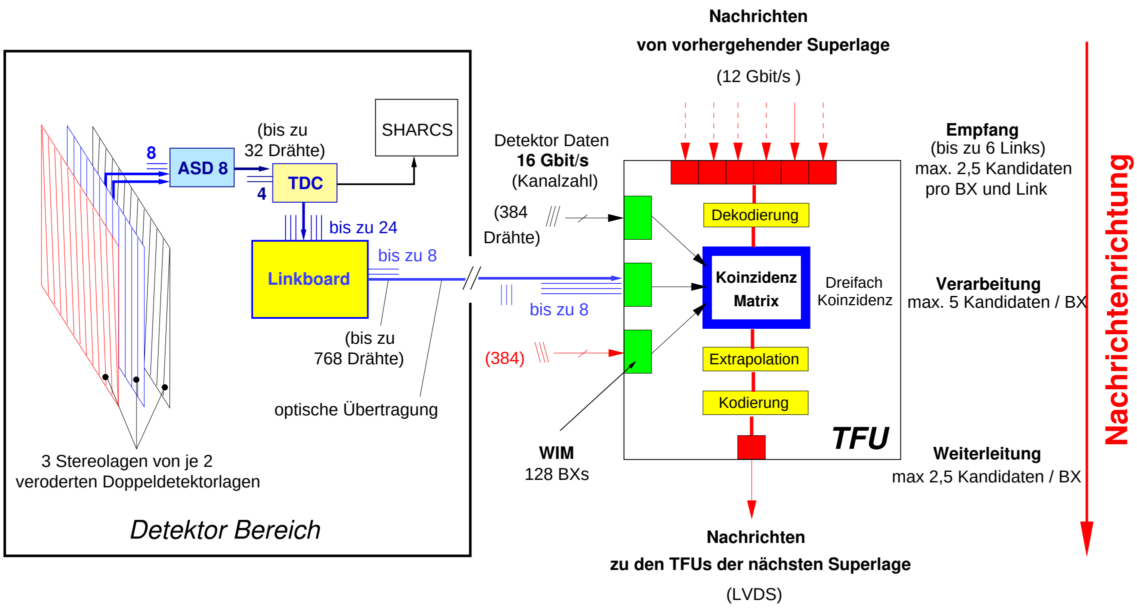


Abbildung 3.7: *Bearbeitung der Spurnachrichten in der Track Finding Unit (TFU). Die TFU erhält zum einen die Daten des ihr zugeordneten Detektorbereichs, zum anderen die Spurnachrichten. Nach Dekodierung der 80 Bit Spurnachricht prüft sie in ihrer Koinzidenzmatrix auf Trefferkoinzidenzen aller drei Superlagen. Findet sie eine passende Koinzidenz, so extrapoliert sie die Spur in die nächste Superlage, aktualisiert die Spurnachricht und sendet sie an die TFUs der nächsten Spurlage. Die linke Seite zeigt der Vollständigkeit halber den Datenweg der Trefferinformationen zu den TFU. Auf diesen soll hier jedoch nicht näher eingegangen werden.*

Findet die TFU mehrere Koinzidenzen in dem zu untersuchenden Suchbereich, so werden entsprechend mehrere Spurnachrichten erzeugt. Überstreckt sich der extrapolierte Suchbereich in der nächsten Superlage über mehrere TFU-Bereiche, so wird die Nachricht vervielfacht und an alle betroffenen TFUs gesendet.
Die Track Finding Units erhalten zunächst die Suchregionen in der Startsuperlage von den drei Pretrigger Systemen. Für den Myon Pretrigger ist dies die Superlage MU04, für den Elektronen Pretrigger und den High-P_T Pretrigger die Superlage TC02. Ausgehend von dieser Superlage wird die Spur schrittweise von Superlage zu Superlage durch die Superlagen TC02, TC01, PC04 bis in die Superlage PC01 extrapoliert. Myonenspurkandidaten werden zusätzlich zunächst durch die Myonspurkammerlagen MU4, MU3 und MU1 verfolgt, bevor sie durch die bereits genannten Spurkammerlagen extrapoliert werden.

Finden auch die TFUs der Superlage PC01 eine Koinzidenz in ihrem Suchbereich, so wird die Spur in eine in der Mitte des Magneten liegende, imaginäre Superlage extrapoliert und die Spurnachricht an die Track Parameter Unit übergeben. Abbildung 3.5 verdeutlicht die schrittweise Extrapolation und Verfeinerung der Spurparameter. Nähere Einzelheiten finden sich in [Fle 01].

3.5.4 Track Parameter Unit (TPU)

In der Track Parameter Unit erfolgt die *Rekonstruktion der Spurparameter* wie des Impulses und der Richtung des Teilchens vor dem Magneten. Für die Berechnungen wird die Annahme zugrunde gelegt, dass die Spur vom Target kommt. Der Impuls der Teilchen wird aus der Ablenkung im Magnetfeld bestimmt, die Ladung des Teilchens wird durch die Richtung der Ablenkung bestimmt. In x-Richtung erfolgt die Berechnung des Impulses P_{xz} mittels der x-Position in der Mittelpunktsebene des Magneten und dem Impaktparameter in der Targetebene durch eine parametrisierte Spurmatrix. In y-Richtung wird eine eventuelle Ablenkung durch das Magnetfeld vernachlässigt und der Impuls P_{yz} direkt aus der Spurrichtung rekonstruiert. Abbildung 3.8 zeigt die Extrapolation der Spur zum Target und die Feldmatrix der Track Parameter Unit.

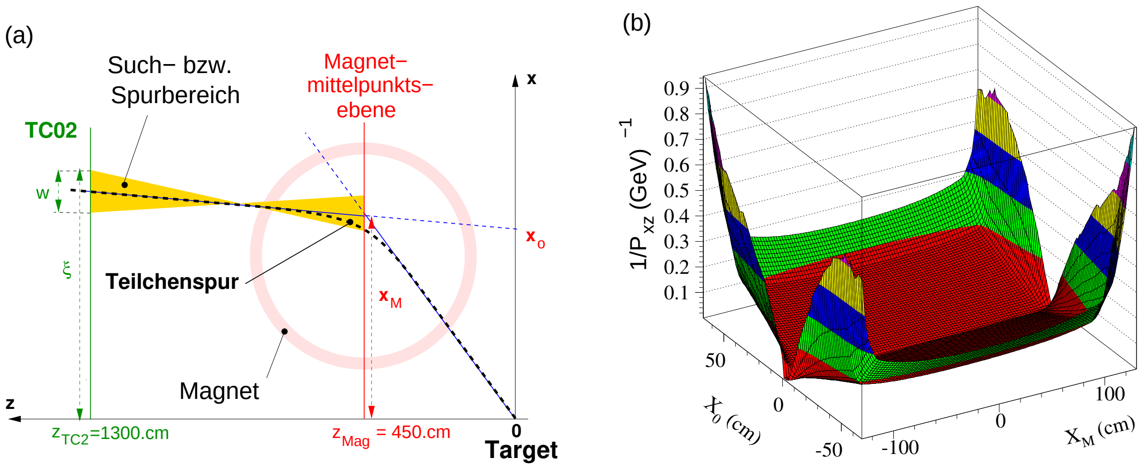


Abbildung 3.8: *Schematische Darstellung der Impulsrekonstruktion in der Track Parameter Unit [Fla 01] und [Rat 96]. (a) Ausgehend von dem in den TFU rekonstruierten Spurbereich wird die Spur unter der Annahme, dass sie vom Target kommt, durch das Magnetfeld extrapoliert. (b) Mit Hilfe des Impaktpunktabstandes x_o sowie der x-Position x_M der Spur im Mittelpunkt des Magneten erfolgt eine Abschätzung des Impulses P_{xz} in der $x-z$-Ebene.*

Ebenfalls in der TPU erfolgt die *Bremsstrahlungskorrektur* der Elektronenspuren: Neben der Rekonstruktion der Cluster erfolgt im ECAL Pretrigger auch die Rekonstruktion der Bremsstrahlungscluster der vor dem Magneten emittierten Bremsstrahlung (vgl. Abschnitt 3.4.1 und 4.3.8). In der TPU ist nun erstmals die Ladung des Teilchens bekannt und damit auch eine eindeutige Zuordnung der Bremsstrahlungscluster möglich. Im Rahmen der Bremsstrahlungskorrektur korrigiert die TPU den aus der Spur rekonstruierten Impuls mit der Energie des Bremsstrahlungsclusters. Durch diese Korrektur ist eine verbesserte Abschätzung des Spurimpulses und damit eine bessere Abschätzung der invarianten Masse der kombinierten Teilchenspuren in der Trigger Decision Unit (TDU) möglich.

Zur Reduktion der Ereignisrate können Schnitte auf den Impuls, den Transversalimpuls sowie für Elektronen auf das Verhältnis E/p der im Kalorimeter rekonstruierten Energie E zum rekonstruierten Impuls p durchgeführt werden. Typische Schnitte sind $p_T > 0,5\,\mathrm{GeV}$ für den Transversalimpuls sowie $0,7 \leq E/p \leq 1,3$ für das Verhältnis E/P für Elektronen. Die TPU übergibt die Spurparameter der akzeptierten Spuren an die Trigger Decision Unit (TDU).
Aufgrund von nahe beieinander liegenden Treffern kann es bei der Spursuche in den Track Finding Units zu einer Vervielfachung identischer Spuren kommen. Um eine unnötige Belastung der Trigger Decision Unit mit identischen Spuren zu vermeiden[25], ist die Track Parameter Unit in der Lage (nahezu) identische Spuren eines Ereignisses zu verwerfen. Sie überprüft dazu den rekonstruierten Impuls und Ladung eines Spurkandidaten mit den entsprechenden Werten der bereits für dieses Ereignis rekonstruierten Spuren. Darüber hinaus kann mit Hilfe eines Zählers ein Schnitt auf die maximale Anzahl akzeptierter Spuren für ein Ereignis durchgeführt werden, um so eine Blockierung der Trigger Decision Unit durch Ereignisse mit sehr vielen Spuren zu verhindern. Abbildung 3.9 zeigt den Einfluss der Unterdrückung identischer Spuren während der Datennahmeperiode 2000. Man erkennt die sehr wirksame Unterdrückung von Spuren identischer Richtung die ansonsten das Spektrum der Spuren dominieren. Nähere Einzelheiten zur Track Parameter Unit finden sich in [Fla 01] und [Fla 01a].

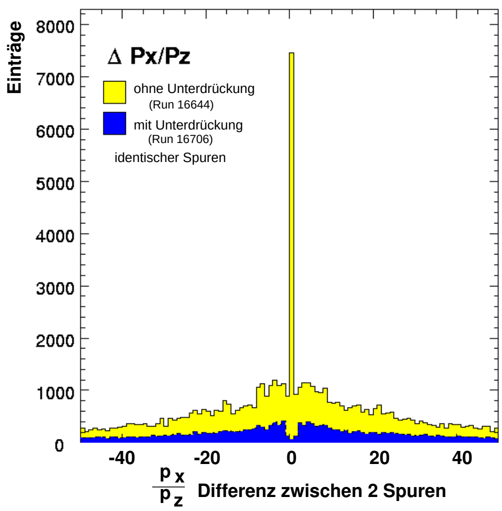


Abbildung 3.9: *Auswirkung der Unterdrückung identischer Spuren in der TPU. Das helle Diagramm zeigt die Differenz der Bitwerte der Spurparameter P_x/P_z für eine Datennahme, bei der die Unterdrückung nicht eingeschaltet war, das dunkle Histogramm mit eingeschalteter Unterdrückung identischer Spuren [Fla 00].*

3.5.5 Trigger Decision Unit (TDU)

Die Trigger Decision Unit (TDU) sammelt die Nachrichten aller Spuren für die verschiedenen Ereignisse. Da die Nachrichten asynchron in den TFUs und TPUs bearbeitet werden, kommen nicht alle Nachrichten eines Ereignisses hintereinander in der TDU an. Die TDU hat deshalb die Aufgabe, die Nachrichten entsprechend der BX-Nummer der Nachricht zu sortieren. Zusätzlich berechnet sie den Transversalimpuls der einzelnen Spuren und markiert die Spur, sofern ihr Transversalimpuls oberhalb eines einstellbaren Schwellenwertes liegt.

[25]Nahezu identische Spuren ergeben eine invariante Masse nahe Null.

Die TDU ist in der Lage, zwei verschiedene Arten von Triggerkategorien zu bearbeiten, die jeweils mehrere Triggerarten beinhalten, wobei sie mehrere der Triggerarten gleichzeitig verwenden kann:

- *Pairtrigger*[26] *mittels Lookuptables*

  Für Spuren gleicher Teilchensorte und entgegengesetzter Ladung werden die Spuren zu Paaren kombiniert und die invariante Masse des Spurpaares in den Lookuptables berechnet. Abhängig von der Teilchensorte kann eine Massenschwelle gesetzt werden, oberhalb derer das Ereignis angenommen wird. Typische Schnittwerte für den J/ψ-Trigger liegen für $\mu^+\mu^-$-Paare bei 2,5 GeV, für e^+e^--Paare bei 2 GeV. Abbildung 3.10 zeigt die MC Massenverteilung des Zerfalls $J/\psi \to l^+l^-$ für Myonen sowie für Elektronen mit und ohne Bremsstrahlungskorrektur.

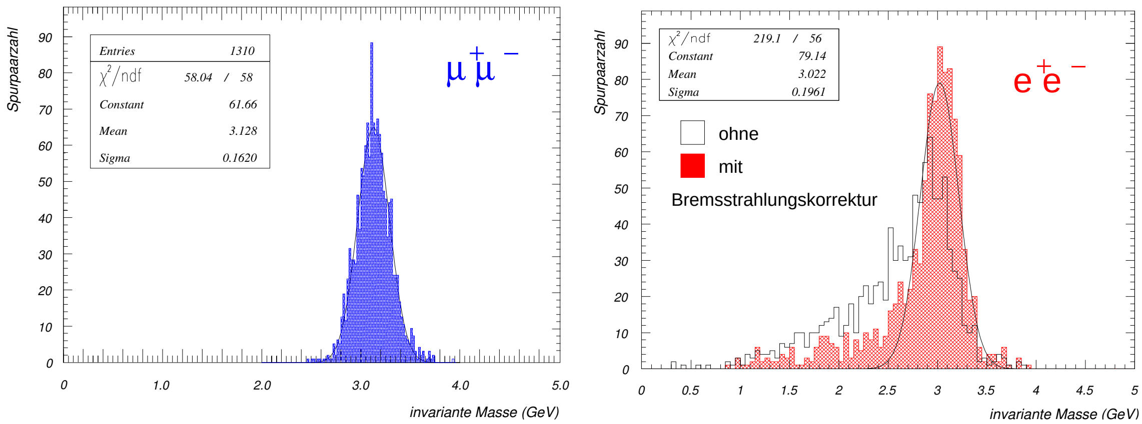


Abbildung 3.10: *Rekonstruktion der invarianten Massen in den Lookuptables der TDU. Links ist die invariante Masse für Myonpaare, rechts für Elektron-Positron-Paare mit und ohne Bremsstrahlungskorrektur dargestellt [Fla 99].*

- *Count Trigger*[27]

  Parallel zum Paartrigger kann auch auf die Anzahl von Spuren einer bestimmten Teilchenzahl getriggert werden. Die Spuren werden dazu in acht Kategorien eingeteilt: vier Teilchensorten (e, μ, h, γ) getrennt nach der Kategorie oberhalb der eingestellten Transversalimpulsschwelle p_T bzw. unterhalb davon. Für jede dieser Kategorien lässt sich eine separate Schwelle einstellen und im Falle der Teilchensorten e, μ, und γ mit einer zusätzlichen Schwelle für die Anzahl an Hadronen h kombinieren. Auf diese Weise kann ein Dileptontrigger z. B. für Ereignisse, bei denen beide B Mesonen semileptonisch zerfallen, realisiert werden [Sch 00, Nör 99].

Akzeptiert die TDU ein Ereignis, so übergibt sie dem SLT die einzelnen Spurnachrichten sowie die Information, welche Arten von Trigger das Ereignis akzeptiert haben. Gleichzeitig werden diese Informationen auch dem Ereignisdatensatz hinzugefügt und so zusammen mit dem rekonstruierten Ereignis zur späteren Analyse gespeichert. Nähere Einzelheiten zur Trigger Decision Unit finden sich in [Nör 99].

[26] engl. für Paartrigger
[27] engl. für Auslöser durch Zähler

MC-Studien haben Effizienzen von $\approx 55\,\%$ für den Zerfall $J/\psi \to \mu^+\mu^-$, $\approx 35\,\%$ für den Zerfall $J/\psi \to e^+e^-$ und $\approx 25\,\%$ für den Zerfall $B^o \to \pi^+\pi^-$ ergeben, wobei die Effizienzen hauptsächlich von den geometrischen Akzeptanzen und den Pretrigger Anforderungen abhängen [Ful 98]. Die niedrigere Effizienz des Elektronkanals kommt hauptsächlich durch Energieverluste durch Bremsstrahlung zustande.

3.6 Der Second Level Trigger (SLT)

Die zweite Trigger Stufe, auch Second Level Trigger (SLT) genannt, erhält von der ersten Triggerstufe die Suchbereiche aller gefundenen Spuren der akzeptierten Ereignisse. Die maximale Eingangsrate liegt bei 50 kHz, wobei kurzzeitige Spitzenraten bis zu 100 kHz tolerabel sind. Zunächst wird zur Unterdrückung von Geisterspuren des FLT mit Hilfe des so genannten *SLICER*-Algorithmus überprüft, ob in den Suchbereichen durchgehende Spuren existieren. Anschließend führt die zweite Triggerstufe mit Hilfe der Pakete *X-Y-REFIT* eine erneute Rekonstruktion der vom FLT gefundenen Spuren mit erhöhter Präzision unter Verwendung aller Spurkammerlagen und der Driftzeitinformationen durch und verlängert die Spuren durch den Magneten hindurch bis zum Vertexdetektor (*L2MAGNET*). Im Vertexdetektor erfolgen schließlich mit Hilfe der Pakete *L2SILI* und *L2VERTEX* eine Rekonstruktion der Spuren im Vertexdetektor und ein Test, ob die Spuren von einem gemeinsamen Vertex stammen. Zusätzlich kann ein Schnitt auf den Impaktparameter der Spuren erfolgen.
Da der FLT während der Datennahmeperiode 2000 noch im Aufbau war, wurde während dieser Zeit ein leicht verändertes Schema verwendet: Für Elektronen erfolgte statt Verwendung der FLT Nachricht eine Rekonstruktion mittels des ECAL Rekonstruktionspaket CARE[28] [Vil 97] zur Generierung der Eingangssuchbereiche, für Myonen wurde die vom FLT weitergeleitete Pretrigger Nachricht verwendet. Das Paket *L2MAGNET* wurde nur zur Berechnung des Kicks im Magneten ohne weitere Anwendung von Schnitten verwendet und das Paket *L2VERTEX* war nicht aktiv.
Die Bearbeitung der Ereignisse in mehreren Teilschritten führt zu stark variierenden Latenzzeiten. Die mittlere Latenzzeit liegt bei 3 ms, die Bearbeitung aller Teilschritte kann bis zu 50 ms benötigen [Ful 99].
Die Algorithmen der zweiten Triggerstufe arbeiten im Gegensatz zur ersten Triggerstufe aufgrund der wesentlich niedrigeren Eingangsrate von 50 kHz auf einer universellen PC-Linux-Farm. Jeder Prozessor ist hierbei in der Lage, alle Algorithmen auszuführen und bearbeitet jeweils ein Ereignis komplett. Die Beschränkung auf Suchbereiche bei den Algorithmen beruht auf der immer noch zu hohen Ereignisrate für eine Übertragung der gesamten Ereignisse an die Prozessoren. Die Daten werden stattdessen während der Ausführung der zweiten Triggerstufe im Second-Level-Buffer zwischengespeichert. Die Speicher sind im Gegensatz zu den Pipelinespeichern der Ausleseelektronik so angelegt, dass sie ein einzelnes Ereignis beliebig lange speichern können.
Akzeptiert ein Prozessor der zweiten Stufe ein Ereignis, so fordert er die gesamten Daten des Ereignisses für die Bearbeitung des Ereignisses mit der dritten Triggerstufe an. Unter Berücksichtigung der mittleren Latenzzeit von 3,8 ms und einer Eingangsrate von 50 kHz werden 190 Prozessoren für die Bearbeitung benötigt.

[28] *CAlorimeter REconstruction package* – Rekonstruktionspaket des Elektromagnetischen Kalorimeters.

Kapitel 4

Aufbau und Simulation des ECAL Pretriggers

In Kapitel 3 wurden das Datennahme und Trigger System des HERA-B Detektors vorgestellt und gezeigt, dass der ECAL Pretrigger den Ausgangspunkt der vierstufigen Triggerkette für die Suche nach Zerfällen $J/\psi \to e^+e^-$ darstellt. Für jedes BX wird im ECAL nach Elektron-Kandidaten gesucht, von diesen der Ort und die Energie rekonstruiert und das Ergebnis an die nächste Triggerstufe, den First Level Trigger, übergeben. Da der First Level Trigger die gefundene Position und Energie als Ausgangspunkt für seine Spursuche verwendet, ist neben der Effizienz bei der Suche nach Elektronkandidaten insbesondere auch die Genauigkeit der Rekonstruktion entscheidend.

Eines der Ziele dieser Arbeit war es, das ECAL Pretrigger System möglichst detailgetreu in einer Simulation abzubilden. Eine Simulation des Pretrigger System ist aus zwei Gründen unerlässlich:

- *Optimierung des Pretrigger Systems und Untersuchung möglicher Fehlfunktionen*
  Zur Untersuchung des Pretrigger Algorithmus an sich, d. h. zur Überprüfung und Optimierung der generellen Funktionsweise des Pretriggers, zur Untersuchung seiner Orts- und Energieauflösung sowie zur Untersuchung des Einflusses der verschiedenen Triggerschnitte auf die generelle Pretriggereffizienz und die Pretriggerrate ist eine detaillierte Simulation unerlässlich. Darüber hinaus kann mit Hilfe einer Simulation auch eine Überprüfung der Hardware auf Fehlfunktionen oder Abweichungen von dem ursprünglichen Design erfolgen.

- *Physikalische Analysen*
  Jegliche physikalische Analysen die auf Ereignissen beruhen, die unter Verwendung des Trigger Systems aufgezeichnet wurden, benötigen die genaue Kenntnis der Effizienzen des Trigger Systems, da ein Trigger System durch die Auswahl bestimmter Ereignisse automatisch den ursprünglichen physikalischen Ereignisdatensatz verändert. Die Analysen benötigen deshalb zur Berechnung der Effizienzen sowie zur Untersuchung der systematischen Einflüsse und der sich daraus ergebenden Fehler eine möglichst detailgetreue Abbildung des Trigger Systems in einer Computersimulation. Die Simulation erlaubt die Untersuchung der Auswirkungen des Trigger Systems auf Ereignisse und Datenauswahl mittels Monte Carlo (MC) und realer Daten.

Im Rahmen dieser Arbeit wurde deshalb die Simulation *EcalSIM* mittels eines objektorientierten Ansatzes in C++ entwickelt, die in der Lage ist, unter Verwendung der gleichen Eingangsdaten wie die Pretrigger Hardware, das gesamte Pretrigger System und damit die 80-Bit-Pretrigger-Nachricht an den First Level Trigger bitgenau zu reproduzieren. Um dieses Ziel zu erreichen, wurde bei der Umsetzung der einzelnen Hardwarekomponenten in der Simulation auf möglichst große Detailtreue geachtet. Darüber hinaus befand sich zum Zeitpunkt dieser Arbeit das ECAL Pretrigger System noch im Aufbau und dementsprechend veränderten sich die Abdeckung und damit die Anzahl und Orte funktionierender Kalorimeterzellen und Pretriggerkanäle von Datennahme zu Datennahme. Bei der Umsetzung des Pretrigger Systems in der Simulation wurde deshalb auf die Möglichkeit der Anpassung der Simulation an die realen Bedingungen mittels externer Konfigurationsfiles geachtet.

In diesem Kapitel wird das ECAL Pretrigger System im Detail vorgestellt, wobei auf die Bereiche, die für die Umsetzung des Pretrigger Systems in der Simulation *EcalSIM* von besonderer Bedeutung sind, vertieft eingegangen wird. Dazu wird zunächst auf die generelle Triggerstrategie des Pretrigger Systems mit den im Pretrigger durchgeführten Berechnungen und Triggerschnitten sowie auf die technische Umsetzung eingegangen. Daran anschließend erfolgt die detaillierte Darstellung der einzelnen Komponenten der beiden Bereiche des ECAL Pretriggers: das Readout und das Pretrigger Board.
Der zweite Teil des Kapitels befasst sich mit dem Aufbau der Pretriggersimulation *EcalSIM* und der Umsetzung der einzelnen Hardwarekomponenten in der Simulation.
Im nächsten Kapitel werden dann auf diese Beschreibungen aufbauend die grundlegenden Eigenschaften des Pretrigger Systems untersucht, bevor im übernächsten Kapitel ein Vergleich der Simulation mit der Hardware erfolgt, um die Güte der Beschreibung der Hardware durch die Simulation zu untersuchen.

4.1 Elektron Trigger Strategie

Die Hauptaufgabe des ECAL Pretriggers ist die Bereitstellung von Elektronkandidaten des Zerfalls $J/\psi \rightarrow e^+e^-$ für die Spursuche im First Level Trigger. Gleichzeitig soll die Pretriggerrate an gefundenen Kandidaten von Untergrundereignissen möglich gering sein. Erreicht wird die Reduktion der Anzahl an Untergrundereigniskandidaten durch entsprechende Schnitte auf die Informationen der Kandidaten.
Ein elektromagnetischer Cluster im Kalorimeter wird für den Pretrigger als Energiedeposition in einem 3×3-Zellenbereich zusammenhängender Kalorimeterzellen – auch Nonett genannt – gemessen (vgl. Abbildung 4.1). Die Messung der Clusterenergie $E_{Cluster}$ ergibt sich durch Summation der neun Zellen, die Clusterposition aus dem Schwerpunkt der Energieverteilung dieses Nonetts.
Eine der grundlegenden Eigenschaften des HERA-B Experimentes, die für das Design des Trigger Systems berücksichtigt werden muss, ist die Tatsache, dass eine sehr große Menge an Daten (z. B. etwa 9 kByte pro Ereignis für den ECAL Pretrigger) für jedes Ereignis bearbeitet werden muss, wohingegen die Belegungsdichte[1] und die Anzahl von Spurkandidaten pro Ereignis gering ist.

[1] in der Größenordnung von 10 % oder weniger

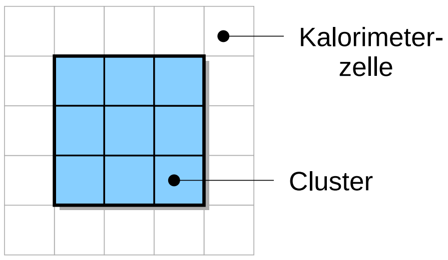


Abbildung 4.1: *Definition eines Clusters im ECAL Pretrigger als 3×3 Zellenbereich zusammenhängender Kalorimeterzellen.*

Auf den ECAL Pretrigger bezogen bedeutet dies die Untersuchung des vollen Kalorimeterbereichs (6000 Auslesekanäle) zur Identifizierung einiger weniger elektromagnetischer Clusterkandidaten pro Bunchcrossing. Der ECAL Pretrigger benutzt die digitalisierten ADC-Signale der einzelnen Kalorimeterzellen als Eingangsdaten und führt eine Clustersuche und Clusterrekonstruktion im Elektromagnetischen Kalorimeter durch.
Das Zeitfenster, das dem FLT inklusive dem Pretrigger zur Verfügung steht, beträgt nur 12,3 μs (vgl. Abschnitt 3.3). Da der FLT davon knapp 8,5 μs für seine Spurrekonstruktion und Triggerentscheidung benötigt, stehen dem Pretrigger insgesamt nur 3,8 μs für die Clustersuche und -rekonstruktion zur Verfügung. Nähere Einzelheiten finden sich in [Ger 00]. Abbildung 4.2 zeigt den generellen Auslese- und Triggerpfad des ECAL Pretriggers.

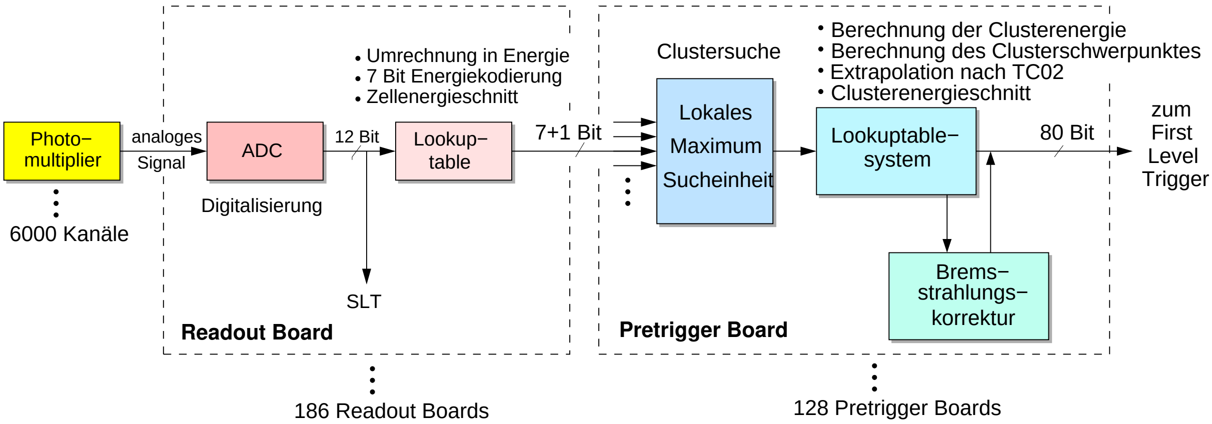


Abbildung 4.2: *Überblick über den generellen Aufbau des ECAL Pretriggers. Dargestellt ist die Kette von der Auslese der analogen Photoelektronen-Vervielfacher-Signale über die Digitalisierung der Signale im ADC, die Konvertierung und Kodierung in einen 7-Bit Energiewert, die Clustersuche mittels Bestimmung der lokalen Maxima und die Clusterberechnungen im Lookuptablesystem des Pretrigger Boards. Die einzelnen Komponenten werden in den nächsten Abschnitten detailliert beschrieben.*

4.1.1 Pretriggerschnitte und Triggerbedingungen

Untergrundereignisse

Ereignisse mit Elektron-Positron-Paaren des Zerfalls $J/\psi \rightarrow e^+e^-$ treten mit einer wesentlich geringeren Rate als die Bunchcrossingrate auf. Die Anzahl der Elektroncluster ergibt sich folglich aus den Untergrundereignissen. Die drei hauptsächlichen Kategorien von Untergrundereignissen sind [Loh 94]:

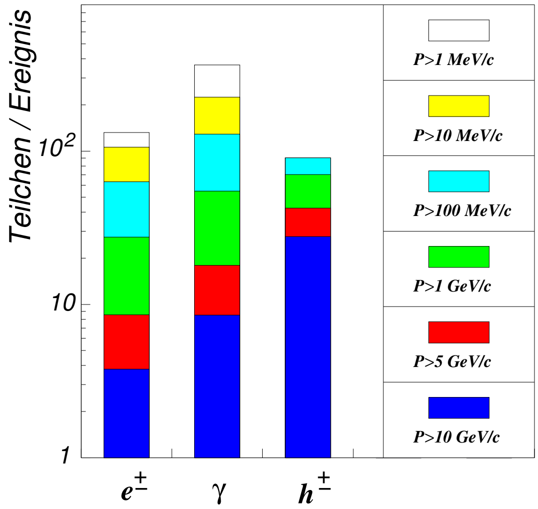


Abbildung 4.3: *Anzahl von Photonen und geladenen Teilchen, die das Kalorimeter pro Bunchcrossing, treffen als Funktion ihrer Energie (für vier überlagerte Wechselwirkungen) [Loh 94].*

- Elektronen aus Photonkonversionsprozessen im Material vor dem Kalorimeter
- Photonen des π^o-Zerfalls, die mit geladenen Hadronen überlappen
- geladene Hadronen, die eine große Energiedeposition im Kalorimeter besitzen

Abbildung 4.3 gibt einen Eindruck über die Anzahl der verschiedenen Teilchenarten, die das Kalorimeter treffen, als Funktion ihrer Energie.

Pretriggerschnitte und Triggerbedingungen

Bei dem Zerfall des J/ψ-Mesons in zwei Elektronen handelt es sich um einen Zwei-Teilchen-Zerfall eines schweren Teilchens ($m_{J/\psi}$ = 3,1 GeV) in zwei leichte Teilchen (m_e = 511 keV). Energie- und Impulserhaltung führen dazu, dass die beiden Leptonen je die Hälfte der Energie des J/ψ-Mesons besitzen und im Schwerpunktsystem des J/ψ-Mesons in entgegengesetzter Richtung fliegen. Aufgrund der geringen Masse der Leptonen entspricht der Leptonimpuls praktisch dieser Leptonenergie (p≈1,5 GeV). Inelastisch erzeugte Teilchen besitzen wesentlich geringere Massen und damit weisen auch ihre Zerfallsteilchen geringere Impulse bzw. Transversalimpulse auf. Die mittleren Transversalimpulse der Leptonen des Zerfalls $J/\psi \to e^+e^-$ sind deshalb größer als die Transversalimpulse von Untergrundereignissen (vgl. Abb. 4.4).
Bei der Lorentztransformation der Impulse vom Schwerpunktssystem in das Laborsystem ist der Transversalimpuls, da er senkrecht zur Transformation steht, invariant, sodass der im Laborsystem gemessene Transversalimpuls dem Transversalimpuls im Schwerpunktssystem entspricht und daher als geeignete Größe zur Unterscheidung zwischen Untergrundereignissen und Leptonen des Zerfalls $J/\psi \to e^+e^-$ herangezogen werden kann. Zusätzlich besitzen auch die J/ψ-Mesonen ihrerseits einen relativ großen Transversalimpuls der sich zu dem durch den Zerfall hervorgerufenen Transversalimpuls der Leptonen addiert und so den Transversalimpuls der Leptonen zusätzlich vergrößert.
Um eine möglichst große Effizienz bei der Rekonstruktion von Leptonclustern des Zerfalls $J/\psi \to e^+e^-$ bei gleichzeitig möglichst geringer Anzahl an Clustern von Untergrundereignissen zu erreichen, wird deshalb ein Schnitt auf die Transversalenergie des Clusters durchgeführt. Zu diesem Zweck wird für die Cluster ein von der x- und y-Position des Clusters abhängiger Schwellenwert $E_{Schnitt}$ für die Energie E definiert:

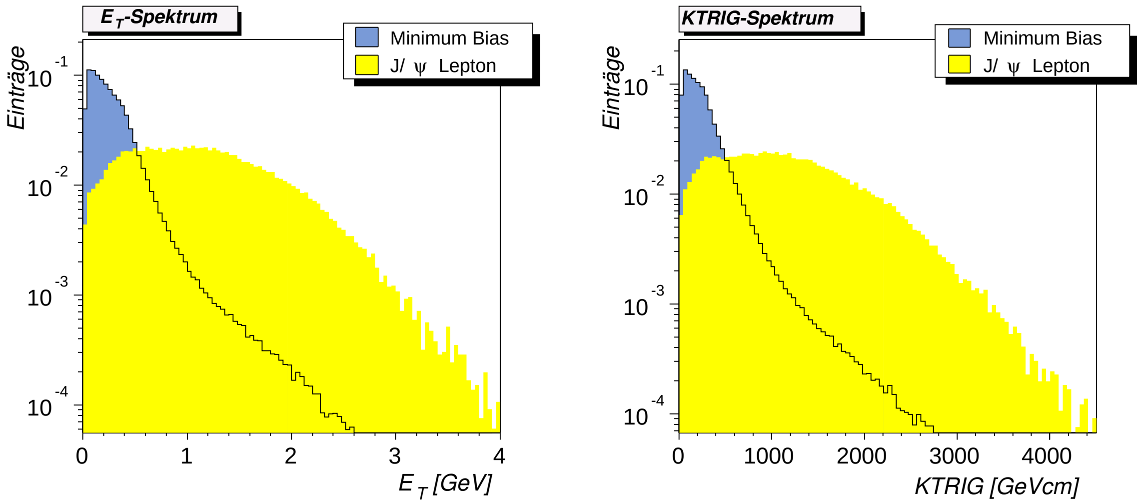


Abbildung 4.4: *E_T und $KTRIG$ Schnitt. Dargestellt sind die E_T und $KTRIG$ Spektren für Cluster der J/ψ-Leptonen und für Cluster von Minimum Bias Ereignissen jeweils normiert auf die Gesamtzahl der Einträge.*

$$E \geq E_{Schnitt} \; . \tag{4.1}$$

Für diesen Schwellenwert kann im ECAL Pretrigger wahlweise ein Schnitt auf die Transversalenergie E_T oder auf den so genannten $KTRIG$-Wert erfolgen, die folgendermaßen definiert sind:

$$E_{Schnitt} = E_{T_{Schnitt}} \cdot \frac{\sqrt{x^2 + y^2 + z^2}}{\sqrt{x^2 + y^2}} \tag{4.2}$$

und

$$E_{Schnitt} = KTRIG_{Schnitt} \cdot \left(\frac{1}{\sqrt{x^2 + y^2}} + \frac{1}{\sqrt{x^2 + \mid y^3 \mid}} \right) \; . \tag{4.3}$$

$E_{T_{Schnitt}}$ in (GeV) und $KTRIG_{Schnitt}$ (in GeV·cm) entsprechen jeweils den einstellbaren Schnittwerten, z ist die z-Referenzposition des FLTs ($z = z_{RefECAL} = 1350$ cm).

Während der Datennahmeperiode 2000 wurde der Transversalenergieschnitt E_T verwendet, der KTRIG-Schnitt wurde für die ursprünglichen Untersuchungen im Proposal des Experimentes (vgl. [Loh 94]) angewendet und entspricht im Wesentlichen ebenfalls einem Transversalenergieschnitt, berücksichtigt jedoch zusätzlich (in seinem zweiten Term) die Asymmetrie in der x- und y-Teilchenverteilung aufgrund der Ablenkung der Teilchen im Magnetfeld. Abbildung 4.4 zeigt die E_T- und $KTRIG$-Spektren der Cluster von Minimum Bias Ereignissen und J/ψ-Leptonen sowie die Effizienz und die relativen Unterdrückungsfaktoren in Abhängigkeit von dem Schnittwert. Die E_T und $KTRIG$-Spektren sind jeweils auf die Anzahl der Einträge normiert. Es muss also zusätzlich beachtet werden, dass der Wirkungsquerschnitt für Minimum Bias Ereignisse wesentlich höher ist (vgl. Tabelle 1.2 und 1.3), d. h., dass die großte Zahl der Pretrigger Kandidaten aus Minimum Bias Ereignissen stammt.

Die vom Pretrigger akzeptierten Clusterkandidaten müssen folgende drei Bedingungen erfüllen:

(1) Die Energie E_c der zentralen Zelle des Clusters muss je nach verwendetem Schnitt oberhalb eines Energieschnittwertes liegen der durch Gleichung 4.2 oder 4.3 berechnet wird. Für die Datennahmeperiode 2000 wurde ein Schnitt bei dem halben Schwellenwert durchgeführt, der für die Gesamtenergie des Clusters gefordert wurde (vgl. Gleich. 4.6):

$$E_c > \frac{E_{Schnitt}}{2} \ . \tag{4.4}$$

(2) Die Energie E_c der zentralen Zelle muss größer sein, als die Energie der unmittelbaren Nachbarzellen:

$$E_c = max\,(E_i) \qquad i = 1..9 \ . \tag{4.5}$$

(3) Die Gesamtenergie des Clusters, d. h. die Summe der Energien der neun Zellen, muss je nach Schnitttyp größer als die in Gleichung 4.2 oder 4.3 definierte Schwelle sein:

$$E_{Cluster} = \sum_{i=1}^{9} E_i \ > E_{Schnitt} \ . \tag{4.6}$$

Typische Werte für den E_T-Schnitt liegen bei $E_{T_{Schnitt}} = 1{,}0$ GeV für den Cluster, typische $KTRIG$-Werte bei $KTRIG_{Schnitt} = 700$ GeV·cm.

4.1.2 Pretriggerberechnungen

Erfüllt ein Clusterkandidat alle drei Bedingungen, so werden folgende Informationen vom Pretrigger System berechnet und in der 80 Bit Pretrigger Nachricht an den First Level Trigger für die Spursuche weitergegeben:

- *Clusterenergie*
  Die Clusterenergie $E_{Cluster}$ ergibt sich als Summe der einzelnen Energien E_i der neun Zellen:
  $$E_{Cluster} = \sum_{i=1}^{9} E_i \tag{4.7}$$
  Da die Extrapolationen im First Level Trigger anhand der gemessenen Energie des Clusters erfolgen, wirkt sich die Energieauflösung ebenfalls direkt auf die Größe und Position der Suchregionen und damit auf die Triggereffizienz und die Raten im First Level Trigger aus. Die Rekonstruktion der Clusterenergie wird in Abschnitt 4.3.5 vorgestellt.

- *x- und y-Position des Clusters (Pretriggerkandidat)*
  Die Position des Clusters wird aus dem Schwerpunkt der Energiedepositionen E_i ermittelt:
  $$x = \frac{\sum_i E_i X_i}{\sum_i E_i} \qquad \text{bzw.} \qquad y = \frac{\sum_i E_i Y_i}{\sum_i E_i} \ . \tag{4.8}$$
  X_i und Y_i sind jeweils die Positionen der Energiedeposition. Da der First Level Trigger die gefundenen Cluster als Keim seiner Spurfindung verwendet ist eine gute Ortsauflösung entscheidend für die Größe und Positionen der Suchregionen und damit für die Triggereffizienz und die Raten im First Level Trigger. So stammen

etwa 50 % der vom Pretrigger akzeptierten und zur FLT Rate beitragenden Untergrundereignisse von Photonen des π^0 Zerfalls, die mit vom Vertex kommenden, geladenen Teilchen überlagert sind [Ben 96]. Durch eine möglichst exakte Bestimmung der Schwerpunktsposition kann diese Untergrundrate deutlich reduziert werden. Die Bestimmung des Clusterschwerpunkts wird in Abschnitt 4.3.6 detailliert vorgestellt.

- *Extrapolation des Clusters in die Superlage TC02*
  Die gefundene Clusterposition wird anhand der kinematischen Bedingungen in die unmittelbar vor dem Kalorimeter liegende Superlage TC02 (vgl. Abb. 2.1, 2.7 sowie 3.6) extrapoliert und die Suchregionsgröße und -position für die Spurfindung in den Track Finding Units (TFU) des First Level Trigger bestimmt (vgl. Abschnitt 3.5.3). Die detaillierte Vorstellung der Extrapolation erfolgt in Abschnitt 4.3.7.

- *Bremsstrahlungskorrektur*
  Da die Leptonen während ihres Durchgangs durch den Detektor einen erheblichen Teil ihrer Energie als Bremsstrahlung emittieren können, erfolgt eine Berechnung der Positionen möglicher zugehöriger Bremsstrahlungscluster sowie die Bestimmung der Bremsstrahlungskorrekturenergien. Die Bremsstrahlungskorrektur wird in Abschnitt 4.3.8 näher vorgestellt.

4.1.3 Technische Realisierung

Um eine Clustersuche und -rekonstruktion in dem sehr kurzen Zeitrahmen ($\leq$ 3,8 μs) durchführen zu können, werden die von den Photoelektronen-Vervielfachern gemessenen analogen Signale mittels eines ADC[2] bereits zu einem frühen Zeitpunkt digitalisiert und anschließend mit Hilfe von so genannten Lookuptables in Energiewerte umgerechnet. Dies ermöglicht eine digitale Weiterverarbeitung der Signale für die Clustersuche und -rekonstruktion.

Digitale Verarbeitung der Daten durch Lookuptables

Lookuptables bestehen aus einem wiederbeschreibbaren Speicherbaustein, dessen Speicherzellen mit den gewünschten Ausgangsdaten gefüllt werden können. Die Daten am Eingang der Lookuptable adressieren den auszulesenden Speicherbereich, sodass die zu den Eingangsdaten gehörenden Ausgangsdaten ähnlich wie in einer Tabelle nachgeschlagen werden können (Abbildung 4.5).
Der Vorteil von Lookuptables gegenüber Prozessoren liegt in der wesentlich schnelleren Verarbeitung der Daten da keine Berechnungen durchgeführt, sondern nur vorberechnete Werte ausgelesen werden müssen. Zugleich behält man die bei Prozessoren vorhandene Flexibilität der nachträglichen Veränderung der Algorithmen: Dies ermöglicht sowohl eine nachträgliche Optimierung der Algorithmen, als auch eine Änderung von Triggerkriterien, falls andere Trigger benötigt oder gewünscht werden.
Der Nachteil der Verwendung von Lookuptables liegt in der begrenzten Anzahl von Eingangs- und Ausgangskanälen, die durch die Größe des Speicherbausteines gegeben sind und die dadurch bedingte Verwendung von gebinnten Werten mit einer reduzierten

[2] *Analog Digital Converter* — engl. für Analog-Digital-Umwandler

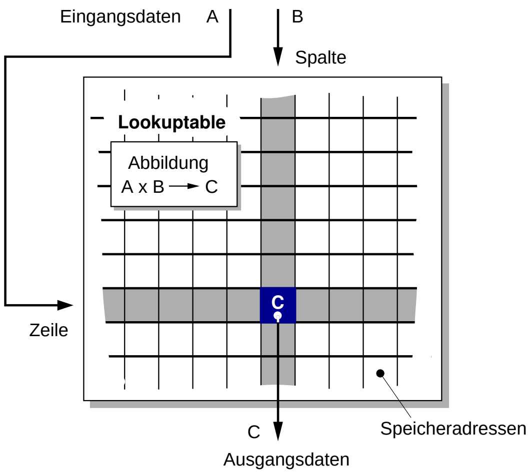


Abbildung 4.5: *Funktionsweise einer Lookuptable. Die auszulesende Speicheradresse wird durch die Eingangsdaten adressiert. Die Größe der Lookuptables definiert sich durch die Anzahl der Eingangsbits (Anzahl an Kombinationen) und Ausgangsbits (Größe einer Speicherzelle).*

Auflösung. Dies bedeutet, dass die durch Lookuptable ermittelten Ergebnisse nur eine im Vergleich zur Verwendung von Fließkommaberechnungen reduzierte Auflösung besitzen. Zusätzlich ist das Lookuptablesystem als Pipeline-Architektur ausgeführt, wodurch die Bearbeitungszeit mehrerer Datensätze mittels paralleler Verarbeitung verkürzt wird (vgl. Abbildung 4.18): Der Name Pipeline deutet an, wie der Datenfluss realisiert ist: Die Daten gelangen zunächst in die erste Verarbeitungseinheit, in welcher der erste Schritt des Algorithmus umgesetzt wird. Das Ergebnis der ersten Verarbeitungseinheit wird an die zweite Verarbeitungseinheit weitergeleitet und dort verarbeitet. Zeitgleich werden in der ersten Verarbeitungseinheit die nächsten Daten bereitgestellt und verarbeitet.

Frühzeitige Datenreduktion

Um zusätzlich die zu verarbeitende Datenmenge frühzeitig zu reduzieren, wird die Pretriggerbedingung (1) (vgl. Abschnitt 4.1.1) bereits bei der Konvertierung der ADC-Werte in Energiewerte in der Lookuptable des Readout Boards (vgl. Abbildung 4.2) überprüft, und nur Zellen, die dieses Kriterium erfüllen, als zentrale Zellen für die Clustersuche berücksichtigt. Durch Bestimmung der lokalen Maxima mittels einen schnellen Algorithmus (Pretriggerbedingung (2)) zu einem sehr frühen Zeitpunkt innerhalb des Pretrigger Boards werden vor der eigentlichen Clusterrekonstruktion die neun zum Cluster gehörenden Zellen – zentrale Zelle sowie die acht Nachbarzellen – festgelegt und nur diese neun Zellen für die Rekonstruktion des Clusters berücksichtigt.
Im Folgenden wird zunächst auf das ECAL Readout Board und anschließend auf das ECAL Pretrigger Board mit seinen zentralen Komponenten eingegangen.

4.2 Das Readout Board

Die Aufgabe des ECAL Readout Board – auch „Front End Driver" (FED)[3] genannt – für den ECAL Pretrigger ist die Transformation der in den Photoelektronen-Vervielfachern des Kalorimeters gemessenen Signale in mit sieben Bit kodierte Energiewerte. Darüber hinaus speichert es die ADC-Werte für den Second Level Trigger bis zu einer Entscheidung des First Level Trigger in einem Ringspeicher.

[3]Bezeichnung für den Teil der Elektronik, der direkt am Detektor sitzt und der unmittelbaren Auslese der Detektoren dient.

4.2.1 Zuordnung der Kalorimeterzellen zu den Readout Boards

Das Readout Board kann bis zu maximal 32 analoge Eingangskanäle mit den Daten der Photoelektronen-Vervielfacher des Kalorimeters bearbeiten. Je nach Kalorimeterabschnitt überdeckt es einen unterschiedlichen Bereich: für das innere Kalorimeter bearbeitet es die 25 Zellen einer 5×5 Matrix, im Falle des mittleren und äußeren Kalorimeter die 32 Zellen einer 8×4 Matrix. Abbildung 4.6 zeigt die Matrix und das Nummerierungsschema der Readout Boards für die verschiedenen Kalorimeterbereiche. 84 Readout Boards lesen das innere Kalorimeter, 40 Boards das mittlere und 62 Boards das äußere Kalorimeter aus (Abb. 4.7). Eine detaillierte Beschreibung findet sich in [Avo 96a]. Abbildung 4.8 zeigt den generellen Aufbau des Readout Boards.

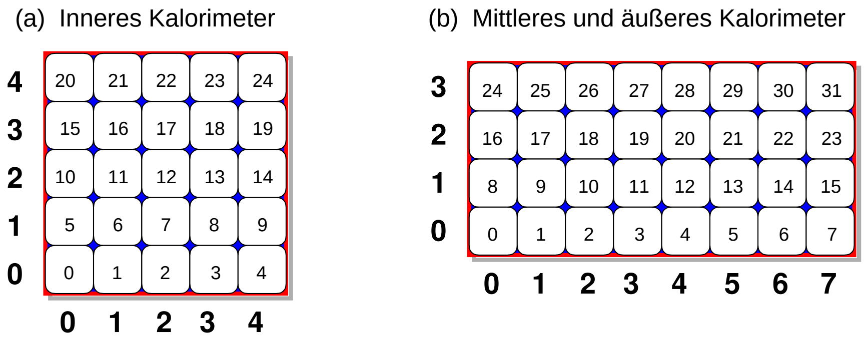


Abbildung 4.6: *Das Readout Board ist im inneren Kalorimeter mit den 25 Zellen einer 5×5-Matrix verbunden, im mittleren und äußeren mit den 32 Zellen einer 4×8-Matrix. Dargestellt ist neben der Spalten- und Zeilennummerierung (fett gedruckt) auch die Zellnummerierung.*

4.2.2 Digitalisierung der analogen Photoelektronen-Vervielfacher-Signale

Die analogen Eingangssignale der Photoelektronen-Vervielfacher werden in einem *ADC* zunächst über einen festen Zeitraum von etwa 60 ns integriert, anschließend komprimiert und in ein 12-Bit-Wert umgewandelt. Der Energiebereich des ADC teilt sich dazu in zwei Bereiche auf, um sowohl Leptonen (mit Energien von bis zu 250 GeV) als auch minimalionisierende Teilchen (MIPS) (mit einer deponierten Energie von etwa 300 MeV) für die Kalibration messen zu können. Nähere Einzelheiten finden sich in [Avo 96, Ben 96].

4.2.3 Energieberechnung, -kodierung und Zellenergieschnitt

Die so erhaltenen 12-Bit ADC-Werte werden im Takt der BX-Rate (96 ns) an eine 4 kByte *Lookuptable (LUT)* weitergeleitet, welche die ADC-Werte unter Verwendung einer für jeden Kanal individuell anpassbaren Energiekalibration in die Zellenergie E umrechnet und diese Energie in einen 7-Bit-Wert E_{7Bit} anhand einer Quadratwurzelkodierung komprimiert (Abbildung 4.9):

$$E_{7Bit} = int\left(\frac{\sqrt{E}}{\sqrt{E_{max}}} \cdot 128 + 0,5\right) \quad . \tag{4.9}$$

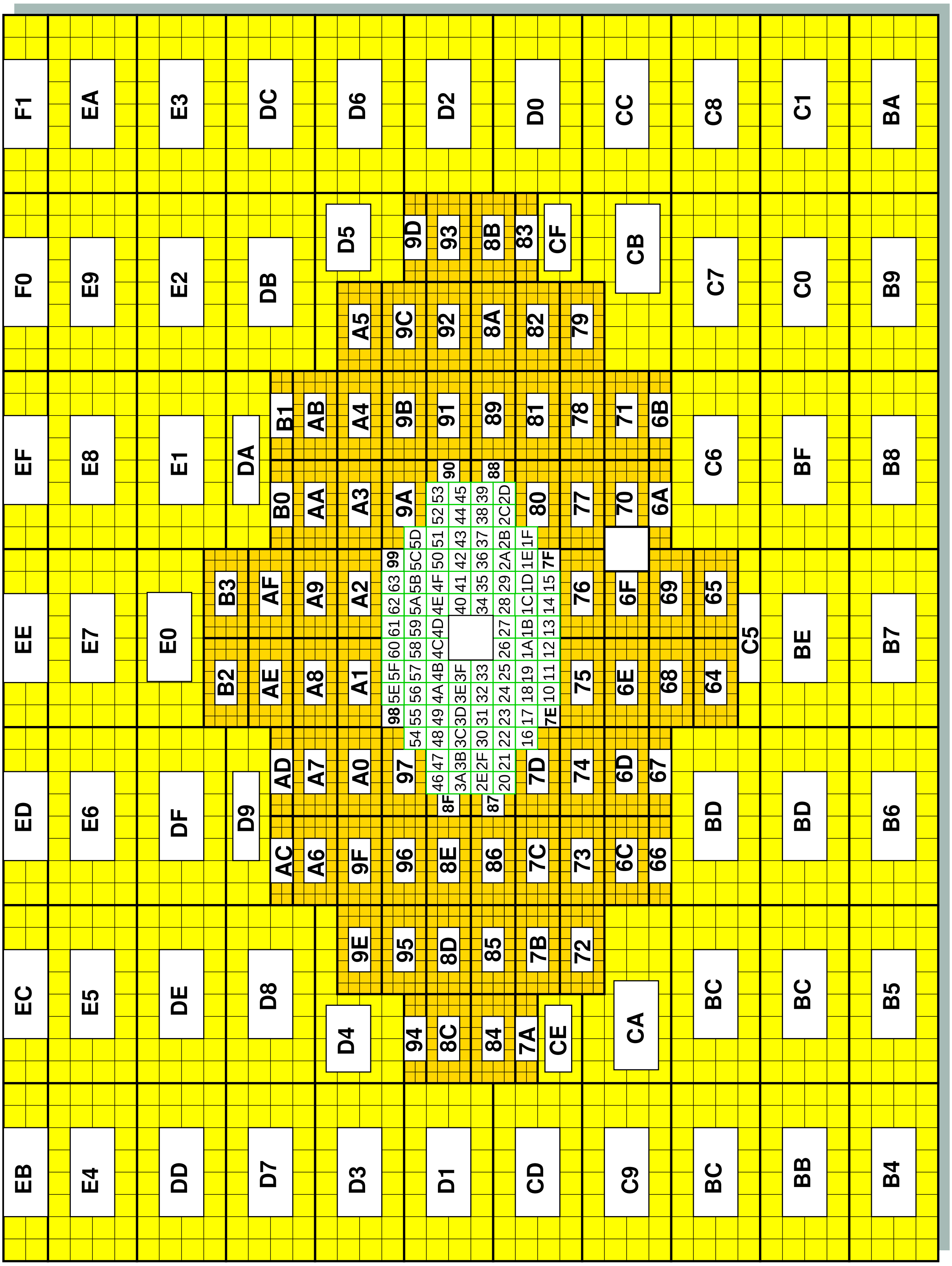


Abbildung 4.7: *Verteilung und Nummerierung der Readout Boards im Kalorimeter. Jedes Kästchen entspricht im mittleren und äußeren Kalorimeter einem Kalorimeterkanal, im inneren Kalorimeter einem Readout Board.*

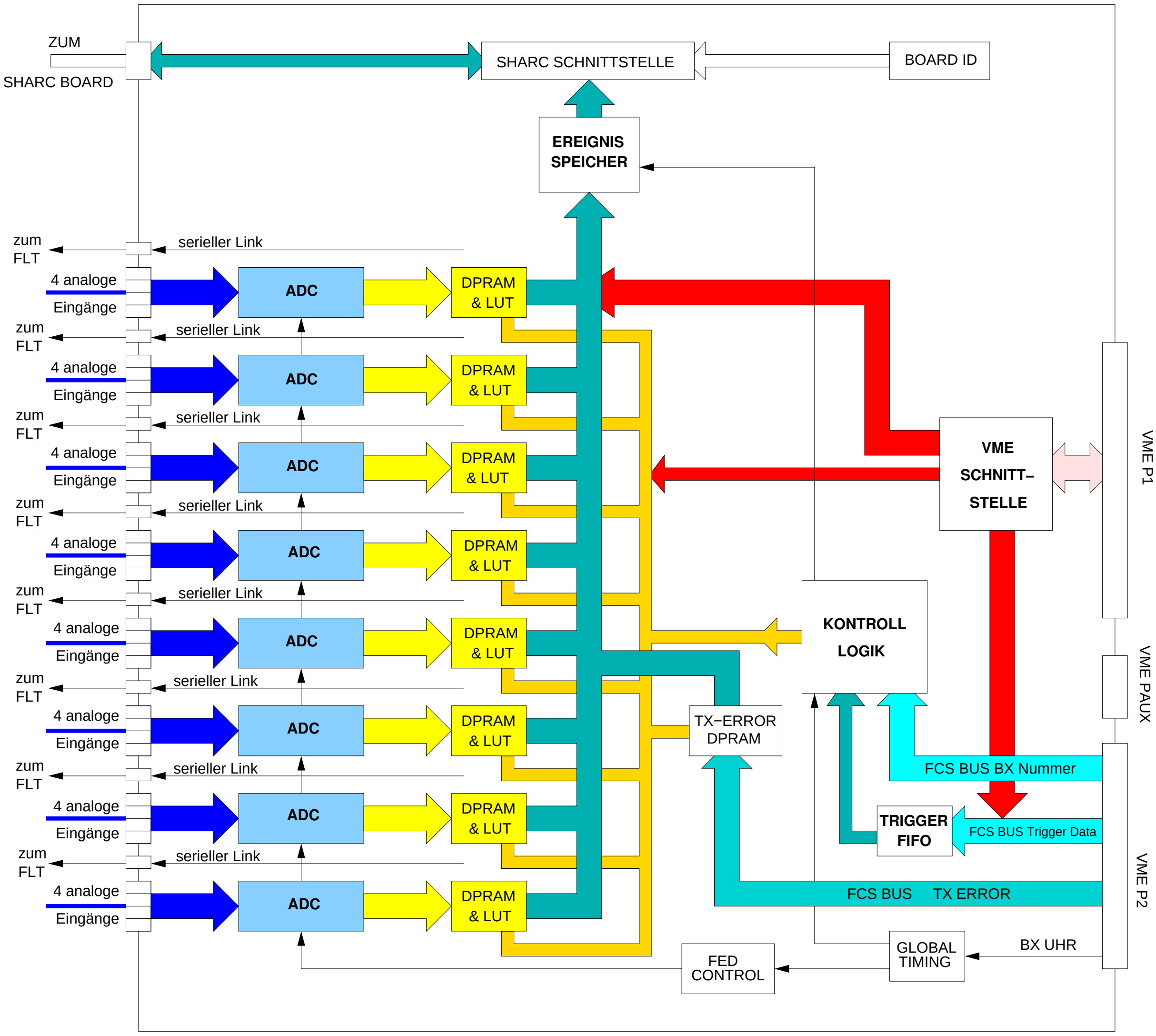


Abbildung 4.8: *Schematische Zeichnung des Aufbaus des Readout Board. Dargestellt sind links die von den Photoelektronen-Vervielfachern kommenden analogen Eingangssignale, die in den ADC-Einheiten digitalisiert und in den Lookuptables in Energiewerte umgerechnet werden. Parallel dazu erfolgt eine Speicherung der ADC-Werte in den DPRAMs für den Second Level Trigger. Die einzelnen Komponenten werden im Text näher beschrieben.*

E_{max} stellt die maximal kodierbare Energie dar und kann für jeden Kalorimeterbereich unabhängig gewählt werden. Abbildung 4.10 gibt einen Eindruck über die auftretenden Zell- und Clusterenergien in den drei Kalorimeterbereichen. Für die Datennahmeperiode 2000 wurde für E_{max} 280 GeV für das innere Kalorimeter, 100 GeV für das mittlere und 65 GeV für das äußere Kalorimeter verwendet.

Zusätzlich wird für Zellen, deren Energiewert E über einer einstellbaren Schwelle liegt, das achte Bit, das so genannten Triggerbit, gesetzt. Dabei kann zwischen einem Transversalenergieschnitt (Gl. 4.2) und einem KTRIG-Schnitt (Gl. 4.3) gewählt werden (vgl. Abschnitt 4.1.1). Nur Zellen, bei denen dieses Triggerbit gesetzt ist, werden im Pretrigger System als zentrale Zellen möglicher Cluster für die Clustersuche und -rekonstruktion verwendet, sodass bereits zu diesem frühen Zeitpunkt der Rekonstruktion eine Reduktion der zu untersuchenden Datenmenge erreicht wird. Dieser 8-Bit-Wert wird über eine

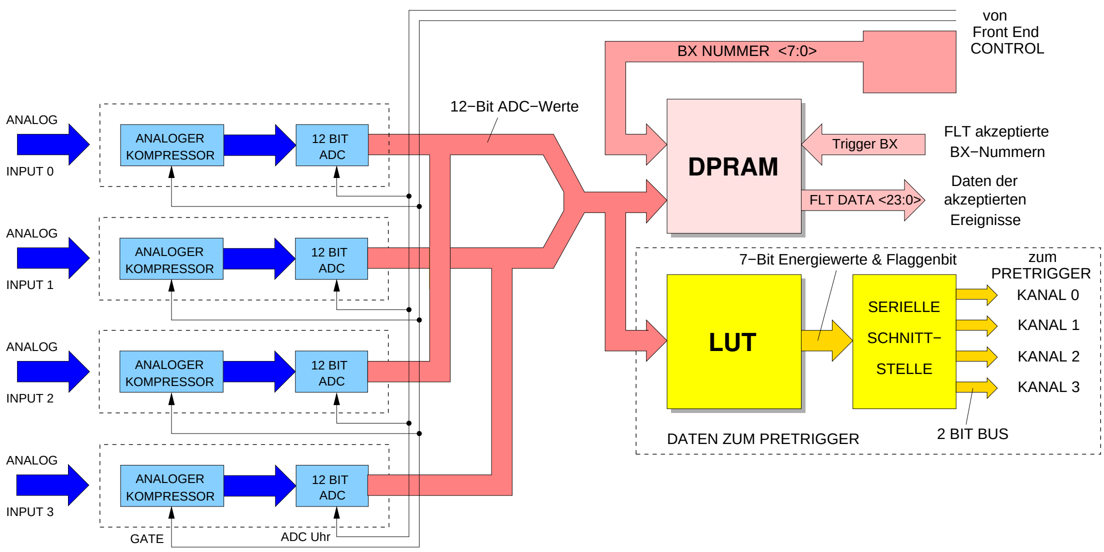


Abbildung 4.9: *Umrechnung der ADC-Werte mittels einer Lookuptable in Absolutenergiewerte und Speicherung in einem Ringspeicher. Dargestellt sind die beiden parallelen Datenpfade der ADC-Werte zum einen zu einer 4 kByte Lookuptable, welche die Energiekalibration und -kodierung in einen 7-Bit Energiewert für das Pretrigger System ausführt, und zum anderen zu einem als Ringspeicher ausgeführten DPRAM, das die ADC Daten bis zu der First Level Trigger Entscheidung zwischenspeichert.*

differentielle TTL[4]-Leitung mit einer Rate von 40 MHz an den Eingang des Pretrigger Boards weitergeleitet.

4.2.4 Speicherung der ADC-Werte für den SLT

Parallel zur Lookuptable werden die ADC-Werte auch in einem *DPRAM*[5,6] für den Second Level Trigger gespeichert. Als Adresse dient dazu die vom Schnellen Kontroll System übermittelte BX Nummer. Das DPRAM ist als ringförmiger Speicher angelegt, d. h. nach 128 Ereignissen wird mit dem 129. Ereignis der erste Speicherplatz überschrieben. Das Readout Board besitzt zusätzlich einen FIFO[7]-Ausgangsdatenpuffer (*Ereignis Speicher*), in den die ADC-Werte der von dem First Level Trigger akzeptierten Ereignisse nach ihrer Auslese aus den DPRAMs bis zu ihrer Weiterleitung über die SHARC-Verbindungen an die Speicher des Second Level Triggers (SLB) zwischengespeichert werden (Abb. 4.8).
Um keinen Datenverlust während kurzzeitiger FLT-Spitzenraten zu erleiden, erlaubt darüber hinaus ein *Trigger-FIFO* die Zwischenspeicherung der BX Nummern derjenigen Ereignisse, die von dem First Level Trigger akzeptiert wurden. Beide FIFOs und die damit verbundene Logik ermöglichen eine Bearbeitung von bis zu 7 aufeinander folgenden

[4] *Transistor Transistor Logik* — Gruppe digitaler logischer Halbleiterschaltungen, bei der zur Verknüpfung und Verstärkung von Signalen Transistoren verwendet werden. (TTL besitzen sehr kurze Schaltzeiten (um 10 ns)).
[5] *Random Access Memory* — Speicher mit wahlfreiem Zugriff
[6] *Dual Port Random Access Memory* — DPRAM bezeichnet ein RAM, bei dem man durch zwei Kanäle innerhalb eines Zyklus schreiben und lesen kann.
[7] *First In First Out* — Ordnungsschema bei Speichern mit sequenziellem Zugriff, nach dem die zuerst eingegebenen Daten als Erste wieder gelesen werden, ähnlich wie bei einem Schieberegister.

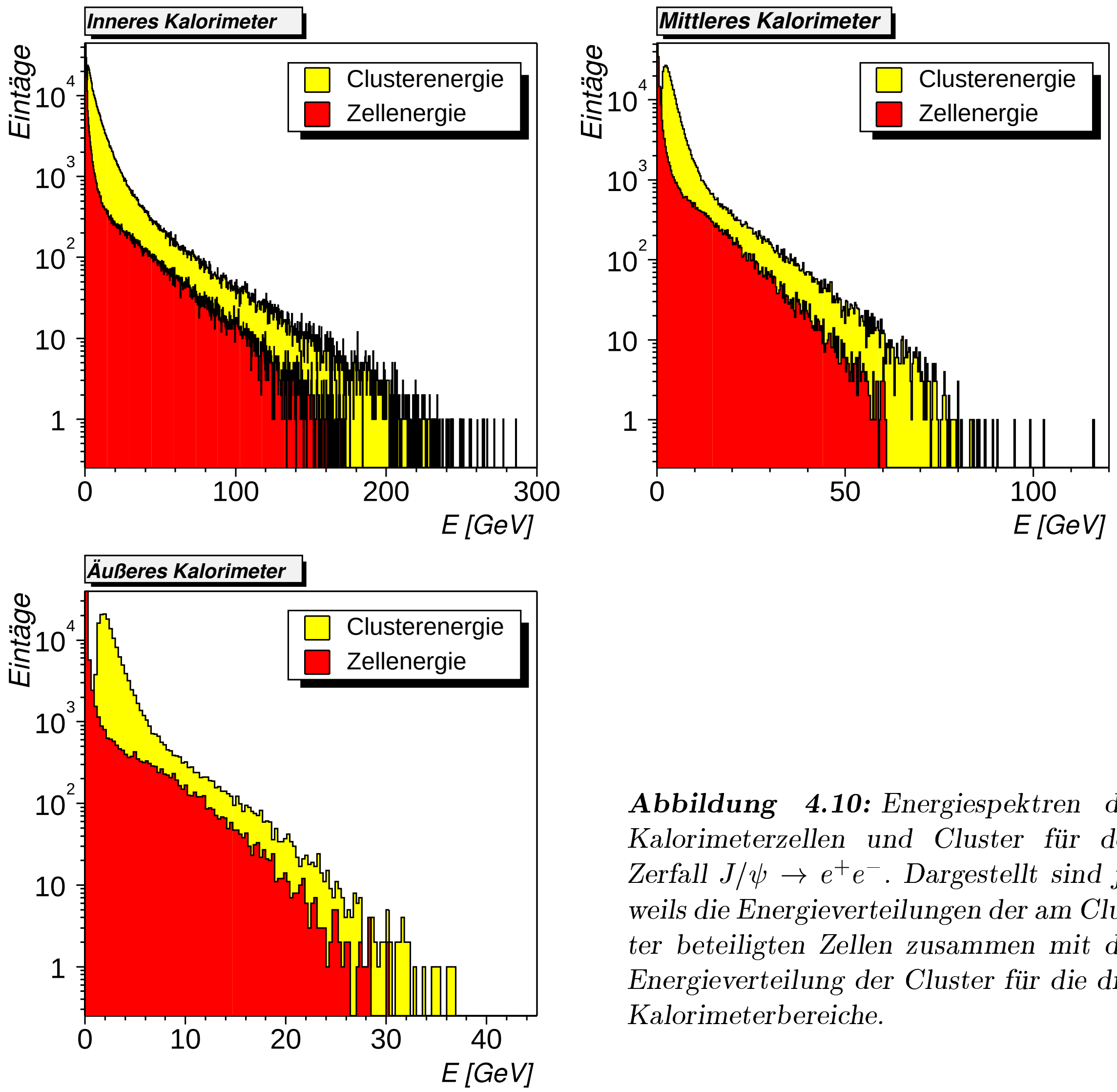


Abbildung 4.10: *Energiespektren der Kalorimeterzellen und Cluster für den Zerfall $J/\psi \to e^+e^-$. Dargestellt sind jeweils die Energieverteilungen der am Cluster beteiligten Zellen zusammen mit der Energieverteilung der Cluster für die drei Kalorimeterbereiche.*

FLT akzeptierten Ereignissen[8]. Von diesen beiden Speichern werden die Daten über einen 80 MHz-Datenbus durch die SHARC-Boards an den SLB weitergeleitet.

Über die VME[9]-Schnittstelle ist sowohl das Laden der Lookuptables als auch eine Überwachung des Boards möglich. Darüber hinaus erlaubt das Readout Board das selektive Einschalten jedes Kanals mittels eines Signals von dem Schnellen Kontroll System zum Testen des Boards und zur Fehlersuche (vgl. Abschnitt 4.4.9).

Die Readout Boards übergeben den Pretrigger Boards die 8-Bit-Werte der einzelnen Zellen. Im nächsten Abschnitt wird auf das Pretrigger Board und seine einzelnen Komponenten näher eingegangen.

---

[8] Als aufeinander folgende Ereignisse gelten hier zwei Ereignisse die weniger als 128 BX-Nummern (die FLT-Pipeline-Länge) auseinander liegen.

[9] *Versa(bus) Module Europe* — Normierte 64 Bit breite Schnittstelle.

4.3 Das Pretrigger Board

Die Aufgabe des Pretrigger Board ist die Auswahl möglicher Clusterkandidaten sowie die Rekonstruktion der Cluster, d. h. die Berechnung der Clusterenergien und der Clusterschwerpunkte. Darüberhinaus führt es eine Extrapolation der Cluster in die Superlage TC02 (vgl. Abbildung 2.1, 2.7 sowie 3.6) anhand der kinematischen Bedingungen aus und bestimmt die Suchregion für den First Level Trigger in dieser Superlage. Zusätzlich berechnet es die Orte möglicher Bremsstrahlungscluster und rekonstruiert diese Bremsstrahlungscluster.

Im Folgenden wird zunächst auf die Zuordnung der Kalorimeterzellen zu den einzelnen Pretrigger Boards eingegangen, bevor eine Übersicht über den generellen Aufbau des Pretrigger Boards gegeben wird (vgl. Abb. 4.13). An diesen Abschnitt schließt sich die detaillierte Beschreibung einzelner, zentraler Komponenten des Pretrigger Boards an, die für die Umsetzung des Pretrigger Systems in eine Simulation besonders wichtig sind. Weitere Beschreibungen der einzelnen Komponenten finden sich auch in [Bal 97b] und [Alb 97].

4.3.1 Zuordnung der Kalorimeterzellen zu den Pretrigger Boards

Das Pretrigger Board kann bis zu 50 Zellen für die Clustersuche und -berechnung bearbeiten. Es bedeckt für das innere Kalorimeter eine Matrix von 10×5-Zellen und für das mittlere und äußere Kalorimeter eine Matrix von 8×6-Zellen. Für jede BX-Nummer kann das Pretrigger Board bis zu drei Cluster berechnen, im Mittel jedoch nur einen Cluster pro BX. Ein Cluster setzt sich jeweils aus einer zentralen Zelle sowie seinen acht umliegenden Zellen zusammen (vgl. Abbildung 4.1). Um auch ein Clusternonett bearbeiten zu können, dessen zentrale Zelle sich am Rand der Matrix befindet, bekommt das Pretrigger Board auch die Informationen der umliegenden Nachbarzellen (Abb. 4.11).

Man unterscheidet deshalb zwischen *zentralen Zellen* der 10×5 bzw. 8×6-Matrix, die sowohl als zentrale Zelle eines Clusters als auch als eine der acht umliegenden Zellen dienen können, und *Randzellen*, die von dem Pretrigger Board nicht als zentrale Zellen eines Clusters verwendet werden. Zellen, die sich in einer Ecke eines Pretrigger Boards befinden, sind entsprechend mit vier Pretrigger Boards verbunden, Zellen am Rand eines Pretrigger Boards mit zwei Pretrigger Boards. Technisch wird dies über Multiplexer realisiert.

Insgesamt decken 42 Pretrigger Boards das innere Kalorimeter, 48 das mittlere Kalorimeter und 38 Pretrigger Boards das äußere Kalorimeter ab. Abbildung 4.12 zeigt die Verteilung der Pretrigger Boards zusammen mit der Nummerierung der Pretrigger Boards. Jedes Kästchen entspricht einem Kalorimeterkanal.

Die einzelnen Kalorimeterbereiche (inneres, mittleres und äußeres Kalorimeter) stellen für den Pretrigger separate Detektoren dar, d. h. es existiert keine Verbindung zwischen den verschiedenen Kalorimeterbereichen. So sind jeweils nur die Zellen eines Kalorimeterbereichs mit dem Board verbunden – liegen die Randzellen in einem anderen Kalorimeterbereich, so sind sie entsprechend nicht verbunden.

4.3.2 Genereller Aufbau des Pretrigger Boards

In diesem Abschnitt erfolgt ein Überblick über den Aufbau des Pretrigger Boards und seiner einzelnen Komponenten. Abbildung 4.13 zeigt den schematischen Aufbau des Pretrigger Boards.

Die *Eingangsschnittstelle (IIF)*[10] des Pretrigger Boards erhält die Energien der einzelnen Zellen als 8-Bitworte kodiert von den zugehörigen Readout Boards im Takt der BX-Rate von HERA (10,4 MHz). Sie gibt die Daten an die Sucheinheit zur Bestimmung der Lokalen Maxima (LMFU)[11] und den Ereignisspeicher und Vervielfacher (EBM)[12] weiter. Der *Ereignisspeicher und -vervielfacher (EBM)* speichert die Daten der einzelnen Zellen

[10] *Input InterFace* — engl. für Eingangsschnittstelle
[11] *Local Maxima Finding Unit* — engl. für Suchmodul zur Bestimmung der lokalen Maxima
[12] *Event Buffer and Multiplexer* — engl. für Ereignisspeicher und -vervielfacher

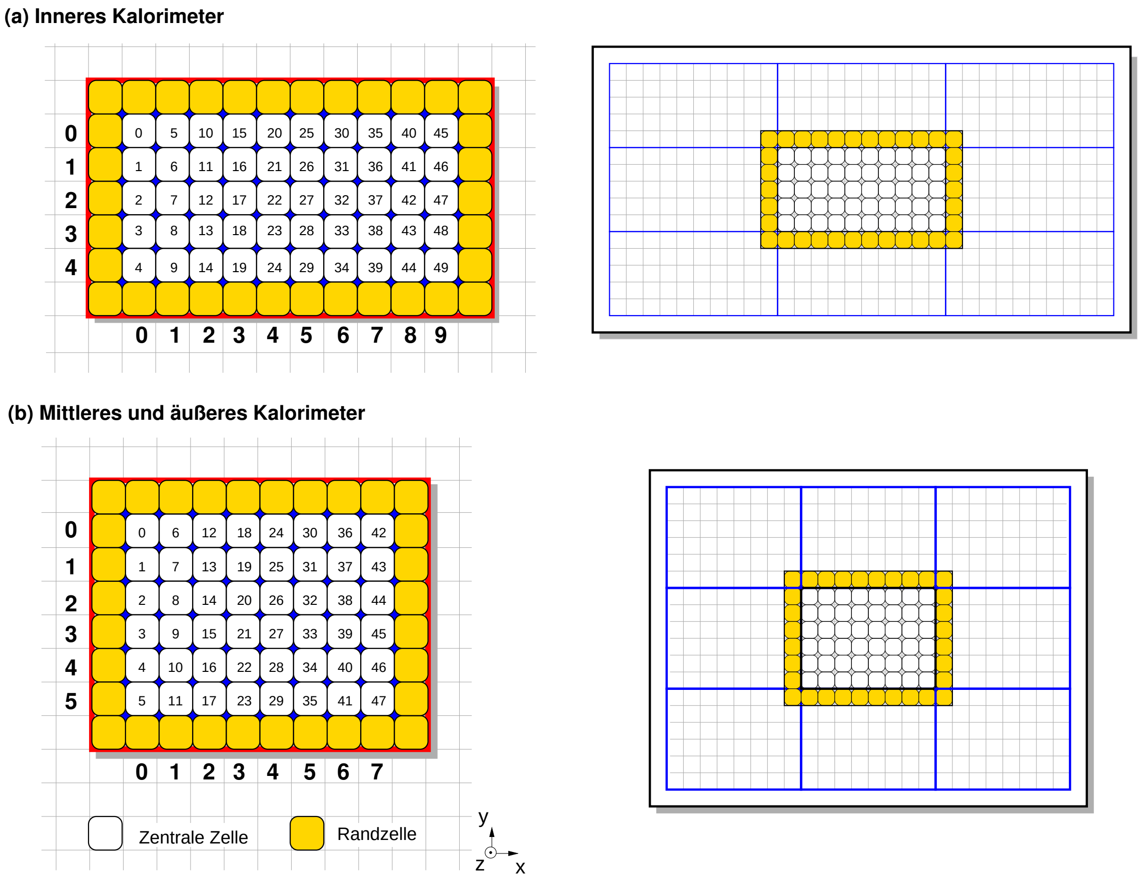


Abbildung 4.11: *Boardmatrix des Pretrigger Boards: Dargestellt sind die Boardmatrizen des Pretrigger Boards für die verschiedenen Kalorimeterbereiche. Im inneren Kalorimeter bearbeitet jedes Pretrigger Board eine Matrix von 10×5-Zellen, im mittleren und äußeren Kalorimeter eine Matrix von 8×6-Zellen. Die zentralen Zellen der Cluster können innerhalb dieses Bereichs liegen (helle Zellen). Um auch für die Zellen am Rand eine Bearbeitung des vollen Nonetts zu ermöglichen, sind zusätzlich die so genannten Randkanäle (dunkel gefärbt) um die 10×5 bzw. 8×6-Matrix herum mit dem Pretrigger Board verbunden. Die Zahlen entsprechen dem Koordinatensystem des Pretrigger Board. Die rechte Abbildung zeigt die Überlappung der benachbarten Pretrigger Boards. Die dunklen Linien entsprechen dabei den Pretrigger Board Grenzen der zentralen Zellmatrix.*

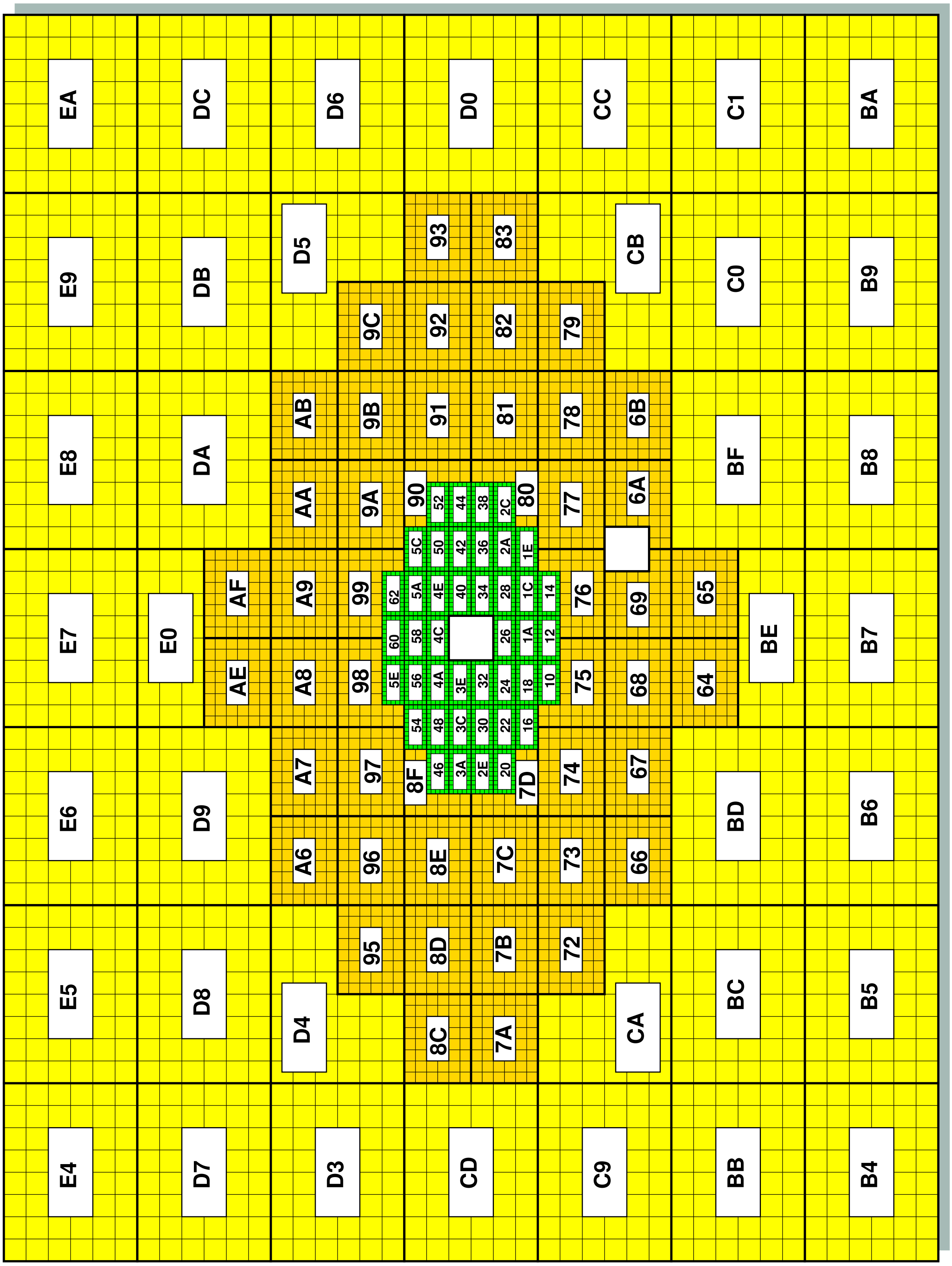


Abbildung 4.12: *Verteilung und Nummerierung der Pretrigger Boards im Kalorimeter. Jedes Kästchen entspricht einem Kalorimeterkanal.*

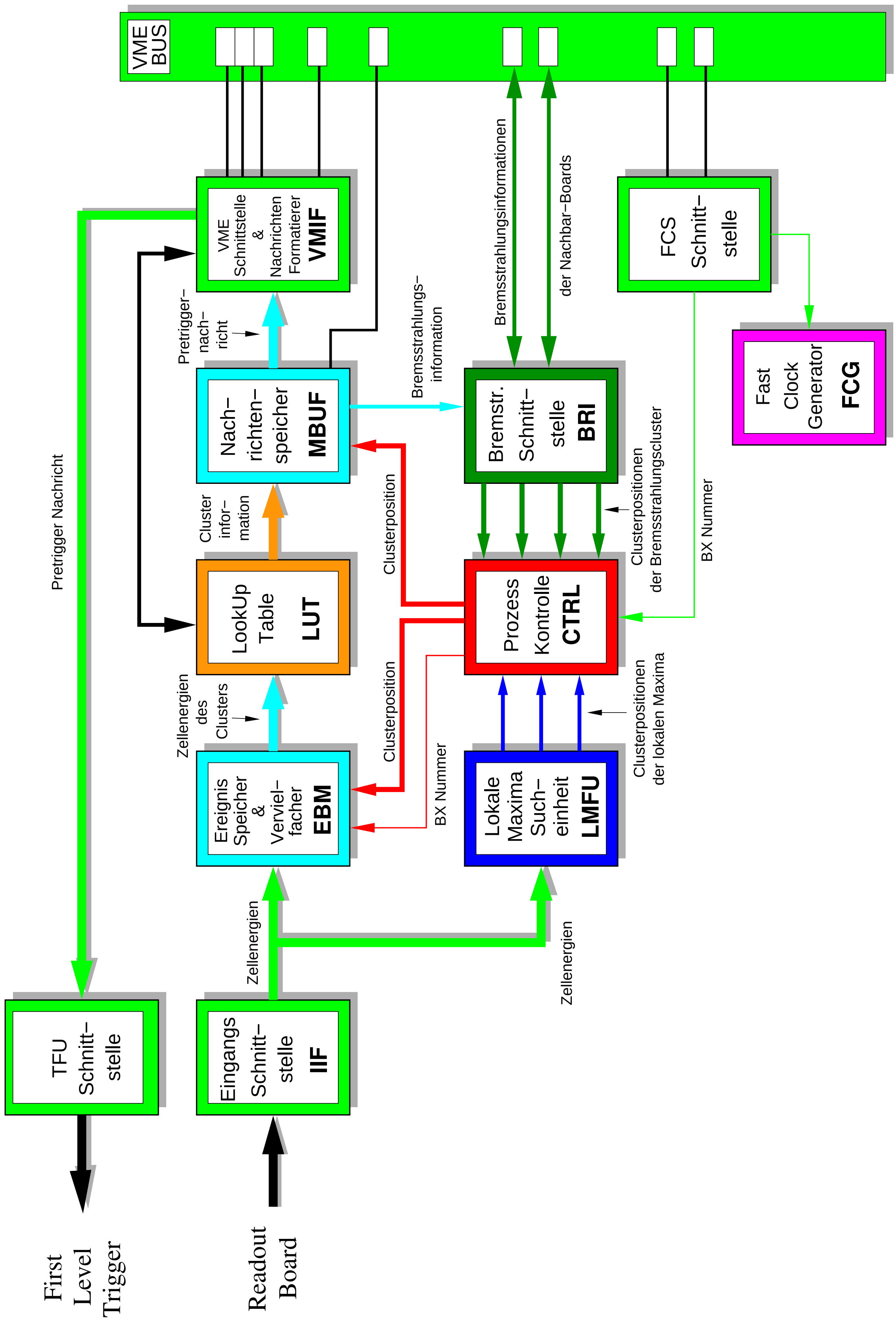


Abbildung 4.13: *Schematischer Aufbau des Pretrigger Boards: Dargestellt sind die einzelnen Komponenten des ECAL Pretrigger Boards sowie der Datenfluss zwischen den Komponenten. Die einzelnen Komponenten und Abkürzungen werden im Text erläutert.*

und kombiniert sie mit der BX Nummer, die er von der Prozesskontrolleinheit (CTRL)[13] bekommt. Er leitet die Energien der einzelnen Zellen auf Anfrage der Prozesskontrolleinheit an das Lookuptablesystem für die Clusterberechnungen weiter.
Das *Suchmodul zur Bestimmung der Lokalen Maxima (LMFU)* dient zur Ermittelung möglicher Clusterschwerpunkte und wählt aus den im Readout Board markierten Zellen (vgl. Abschnitt 4.2.3) diejenigen Zellen aus, bei denen es sich bezüglich der Zellenergien um ein lokales Maximum im Vergleich zu ihren unmittelbaren Nachbarzellen handelt. Sie gibt die Adressen von maximal drei Zellen pro BX an die Prozesskontrolleinheit weiter. Eine detaillierte Beschreibung des Algorithmus und des Aufbaus der LMFU erfolgt im Abschnitt 4.3.3.

Berechnung der Clusterinformationen

Die *Prozesskontrolleinheit (CTRL)* steuert die Prozesse innerhalb des Boards und besteht neben einer Steuereinheit aus mehreren FIFO-Speichern. In den FIFO-Speichern werden die Koordinaten der zu untersuchenden Cluster zusammen mit der relativen BX-Nummer gespeichert. Die Prozesskontrolleinheit besitzt drei FIFO-Speicher für die Speicherung der von der LMFU-Einheit ausgewählten Zellpositionen der lokalen Maxima sowie vier weitere FIFO-Speicher, welche die Koordinaten der Zellen möglicher Bremsstrahlungscluster speichert. Zwei dieser vier Speicher werden für Bremsstrahlungskorrekturen des eigenen Boards verwendet, zwei weitere für die Bremsstrahlungskorrekturen der beiden Nachbarboards rechts und links. Die Kontrolleinheit wählt pro BX-Takt nach gewissen Prioritäten aus den FIFO-Speichern drei Zellen aus und leitet sie an den Ereignisspeicher (EBM) und den Nachrichten Speicher (MBUF) weiter. Nähere Einzelheiten zur Selektion und zur Prozesskontrolleinheit finden sich in [Bal 97c].
Der Ereignisspeicher leitet die Energien der Zellen, die zu den in der Prozesskontrolleinheit ausgewählten Zellen gehören, an das *Lookuptablesystem (LUT)* weiter. Im Lookuptablesystem finden die eigentlichen Berechnungen des Pretrigger Boards statt, d. h. die Berechnung der Clusterenergie, des Clusterschwerpunktes, die Extrapolation in die Superlage TC02, der Triggerschnitt sowie die Berechnung der Koordinaten möglicher Bremsstrahlungscluster. Das Lookuptablesystem leitet die Ergebnisse seiner Berechnungen an den Nachrichtenspeicher weiter. Eine detaillierte Beschreibung des Lookuptablesystem und der Berechnungen findet sich ab Abschnitt 4.3.4.
Der *Nachrichtenspeicher (MBUF)*[14] besteht aus acht RAMs und einer Kontrolleinheit, die den Datenfluss innerhalb des Nachrichtenspeichers kontrolliert. Neben der Steuerung der Speicherung der Daten dient diese Kontrolleinheit auch zur Unterscheidung zwischen den Clusterergebnissen, die von den Berechnungen des eigentlichen Clusters kommen, und denen, die von der Berechnung der Bremsstrahlungscluster kommen. Es empfängt neben den Ergebnissen der Lookuptableberechnungen der Cluster auch die Ergebnisse der Lookuptableberechnungen der Bremsstrahlungscluster und speichert und kombiniert diese Informationen in den acht RAMs. Der Nachrichtenspeicher leitet darüber hinaus die Information der Koordinaten möglicher Bremsstrahlungscluster an die Bremsstrahlungsschnittstelle (BRI)[15] weiter.

[13] *ConTRoL* — engl. für Kontrolle
[14] *Message BUFFer* — engl. für Nachrichtenspeicher
[15] *BRemstrahlungs Interface* — engl. für Bremsstrahlungsschnittstelle

Bremsstrahlungskorrektur

Die *Bremsstrahlungsschnittstelle (BRI)* steuert die komplette Bremsstrahlungskorrektur. Die Koordinaten des Bremsstrahlungscluster können innerhalb der Boardmatrix oder in der Boardmatrix des unmittelbaren Nachbarboards rechts bzw. links liegen. Liegen die Koordinaten innerhalb des eigenen Boards, so werden die von dem Nachrichtenspeicher kommenden Koordinaten des Bremsstrahlungscluster direkt an die FIFO-Speicher der Kontrolleinheit (CTRL) des eigenen Boards weitergeleitet. Liegen die Koordinaten in den Nachbarboards, so leitet die Bremsstrahlungsschnittstelle die Information über die VME-Schnittstelle an die entsprechende Bremsstrahlungsschnittstelle des Nachbarboards weiter. Dementsprechend leitet die Bremsstrahlungsschnittstelle auch die Koordinaten, die sie von den Nachbarboards bekommt, an die FIFO-Speicher der Kontrolleinheit (CTRL) weiter. Die Energie der Bremsstrahlungscluster wird auf die gleiche Weise wie die der eigentlichen Cluster durch das Lookuptablesystem berechnet: Die Koordinaten der Zellen des Bremsstrahlungscluster werden von der Kontrolleinheit (CTRL) an den Nachrichtenspeicher und den Ereignisspeicher weitergegeben. Der Ereignisspeicher gibt die Energien der zum Cluster gehörenden Zellen an das Lookuptablesystem zur Berechnung der Clusterenergie weiter und das Ergebnis der Berechnungen des Lookuptablesystems wird anschließend an den Nachrichtenspeicher gegeben. Sofern es sich um einen Bremsstrahlungscluster eines Clusters des eigenen Boards handelt, kombiniert der Nachrichtenspeicher die Information des Bremsstrahlungscluster mit der des Clusters in seinen RAMs, handelt es sich um einen Bremsstrahlungscluster eines Clusters des Nachbarboards, so wird die Information über die Bremsstrahlungsschnittstelle (BRI) an das Nachbarboard weitergeleitet.

Erzeugung der Pretrigger Nachricht

Liegen alle Teile der Pretriggernachricht (also Clusterenergie, -position, Bremsstrahlungskorrekturenergien etc.) im Nachrichtenspeicher (MBUF) vor, so wird die Nachricht von dort an die *VME-Schnittstelle und Nachrichtenformatierer (VMIF)*[16] weitergeleitet. In der VME-Schnittstelle erfolgt dann die Zusammenstellung der aus vier 20-Bitworten bestehenden Pretrigger Nachricht für den First Level Trigger.

Steuerung und Zeitsignal

Zur Synchronisierung und zeitlichen Steuerung des Pretrigger Boards und zur Markierung der Pretrigger Nachricht mit der BX-Zahl bekommt die FCS-Schnittstelle die Bunchcrossing Nummer (BX) vom FCS und leitet sie an die Prozesskontrolleinheit (CTRL) weiter. Gleichzeitig wird auch die HERA-Uhr an den *Zeitsignal-Generator* (FCG)[17] weitergeleitet, der das interne Zeitsignal für das Pretrigger Board generiert. Es erlaubt auch die Verzögerung des Zeitsignals, um die verschiedenen Bausteine des Pretrigger Boards zu synchronisieren. Intern arbeitet das Pretrigger Board mit einem 24 ns-Takt, also dem vierfachen Takt der HERA-BX-Uhr.

[16] *VME Message InterFace* — engl. für VME-Schnittstelle und Nachrichtenformatierer
[17] *Fast Clock Generator* — engl. für Schnelles Zeitsignal Generator

4.3.3 Suchmodul zur Bestimmung lokaler Maxima (LMFU)

Das Suchmodul zur Bestimmung der Lokalen Maxima (LMFU) dient zur Auswahl der Schwerpunkte der Cluster d. h. der zentralen Zellen von Clustern innerhalb der Matrix von 10×5 (bzw. 8×6) Zellen eines Boards. Als zentrale Zellen eines Cluster gelten Zellen, die folgende Bedingungen erfüllen:

- Die Zelle muss oberhalb der Triggerschwelle für eine einzelne Zelle des Readout Boards liegen. Zellen, die diese Bedingung erfüllen haben das höchstwertigste Bit (Bit 7) aktiviert (vgl. Abschn. 4.1.1 und 4.2.3).
- Es muss sich um ein lokales Maximum bezüglich der unmittelbaren, nicht diagonalen Zellen handeln, d. h. die Energie der Zelle muss höher sein als die Energie der unteren, oberen, rechten und linken Nachbarzelle (vgl. Abbildung 4.14).

Das Suchmodul zur Bestimmung der Lokalen Maxima innerhalb des Boards ist in einem 4013 FPGA Xilinx Prozessor implementiert. Den zwei verschiedenen Matrizenformen (10×5 und 8×6) wird durch zwei verschiedene Programme, die in den Prozessor geladen werden können, Rechnung getragen.
Die LMFU bekommt zunächst die Daten aller zentralen Zellen sowie der vier Eckzellen des Boards von der Eingangsschnittstelle in serieller Form. Als Ausgangssignal liefert es die Adressen von maximal drei Zellen, welche die oben genannten Bedingungen erfüllen. Zunächst werden im ersten Teil der LMFU alle möglichen Zellkandidaten, welche die beiden obigen Bedingungen erfüllen, markiert. Da ein Board nur in der Lage ist, maximal drei Kandidaten pro BX zu bearbeiten, erfolgt im zweiten Teil der LMFU, sofern mehr als drei Kandidaten existieren, eine weitere Selektion möglicher Kandidaten entsprechend gewisser Prioritäten.

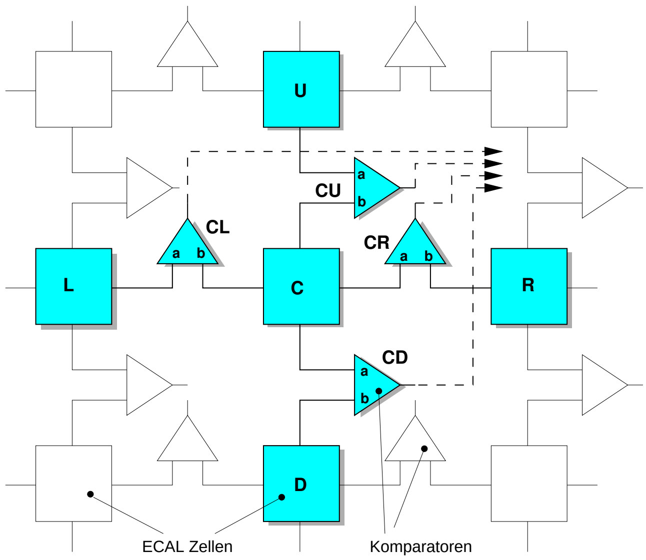


Abbildung 4.14: *Komparator der LMFU. In der Mitte befindet sich die zentrale Zelle (C), die mit ihren nicht diagonalen unmittelbaren Nachbarn (U, D, R, L) verglichen wird (farblich hervorgehoben). Der Vergleich findet durch zweifache, serielle Komparatoren (CU, CD, CR, CL) statt, die jeweils 2 Bits der beiden Zellen miteinander vergleichen. Der Schaltkreis zur Kombination der Ergebnisse der vier Komparatoren ist gestrichelt eingezeichnet.*

Um die lokalen Maxima zu finden, werden zunächst die Energiewerte aller Zellen mit denen ihrer nicht diagonalen Nachbarn verglichen (Abb. 4.14). Ein Vergleich der beiden 7-Bit-Energiewerte erfolgt in mehreren Schritten, bei denen jeweils ein aus 2 Bit bestehendes Bitpaar durch einen zweifachen, seriellen Komparator miteinander verglichen wird (Abb. 4.15): Der Vergleichszyklus beginnt mit der Überprüfung ob das höchstwertigste Bit (Bit 7), das so genannte Triggerbit der zentralen Zelle, gesetzt ist. Ist dies nicht

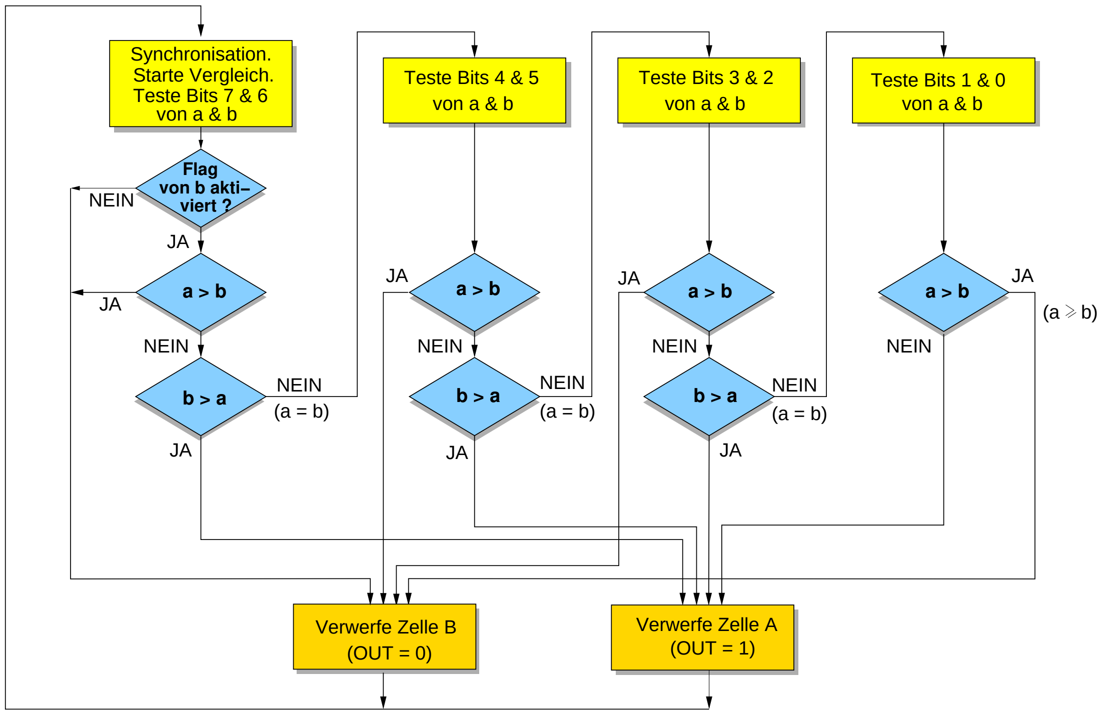


Abbildung 4.15: *Flussdiagramm des Vergleichsprozesses zweier Zellen in der LMFU.*

der Fall, so wird die zentrale Zelle C für die weiteren Vergleichstests verworfen, da sie bereits vom Readout Board als möglicher Kandidat verworfen wurde. Ist das Triggerbit gesetzt, so beginnt der Vergleich der Energie der beiden Zellen mit einem Vergleich des höchstwertigsten Bit (Bit 6) der Energie. Anschließend werden nacheinander die Bitpaare 5 und 4, 3 und 2 sowie 1 und 0 verglichen. Sind bei dem Vergleich die beiden Bitpaare unterschiedlich, so wird der Komparator angehalten. Jede Zelle besitzt einen Schaltkreis, der die Ergebnisse der vier Komparatoren vereint und '0' im Falle einer erfolgreichen Überprüfung aller vier Komparatoren, '1' für den Fall, dass die Zelle verworfen wurde, in einem Register speichert [Bal 97a].

Alle so gefundenen Zellen werden in der Zellmatrix des Boards als Clusterkandidatenzellen markiert und diese Zellmatrix an drei hintereinander geschaltete Selektionseinheiten weitergeleitet, die jeweils – falls vorhanden – einen Kandidaten entsprechend eines Prioritätsmusters auswählen. Die Auswahl der Zelle mit der höchsten Priorität wird in jeder der drei Selektionseinheiten separat durchgeführt und besteht aus zwei Schritten (Abbildung 4.16): Zunächst wird für jede Zeile die Clusterkandidatenzelle (falls vorhanden) mit der höchsten Priorität innerhalb dieser Zeile ausgewählt (*Primär-Spalten-Selektoren*). Aus den so ausgewählten Zellen wird in einem zweiten Schritt diejenige Zelle ausgewählt, die sich in der Zeile mit der höchsten Priorität befindet (*Sekundär-Zeilen-Selektoren*). Von der so gefundenen Zelle wird die Zeilen und Spalteninformation an den Ausgang gelegt und das Gültigkeits-Bit aktiviert.

Innerhalb der Zeilen besitzt die Zelle ganz rechts die höchste Priorität und die Priorität nimmt von rechts nach links ab. Bei der Auswahl der Zeile nimmt die Priorität von oben nach unten ab. Um dabei keine systematische Bevorzugung einer Zelle hervorzurufen, ist die Zeile mit der höchsten Priorität variabel. Beim Start des Boards ist es zunächst die oberste, anschließend wird sie bei jedem BX um eine Zeile nach unten verschoben.

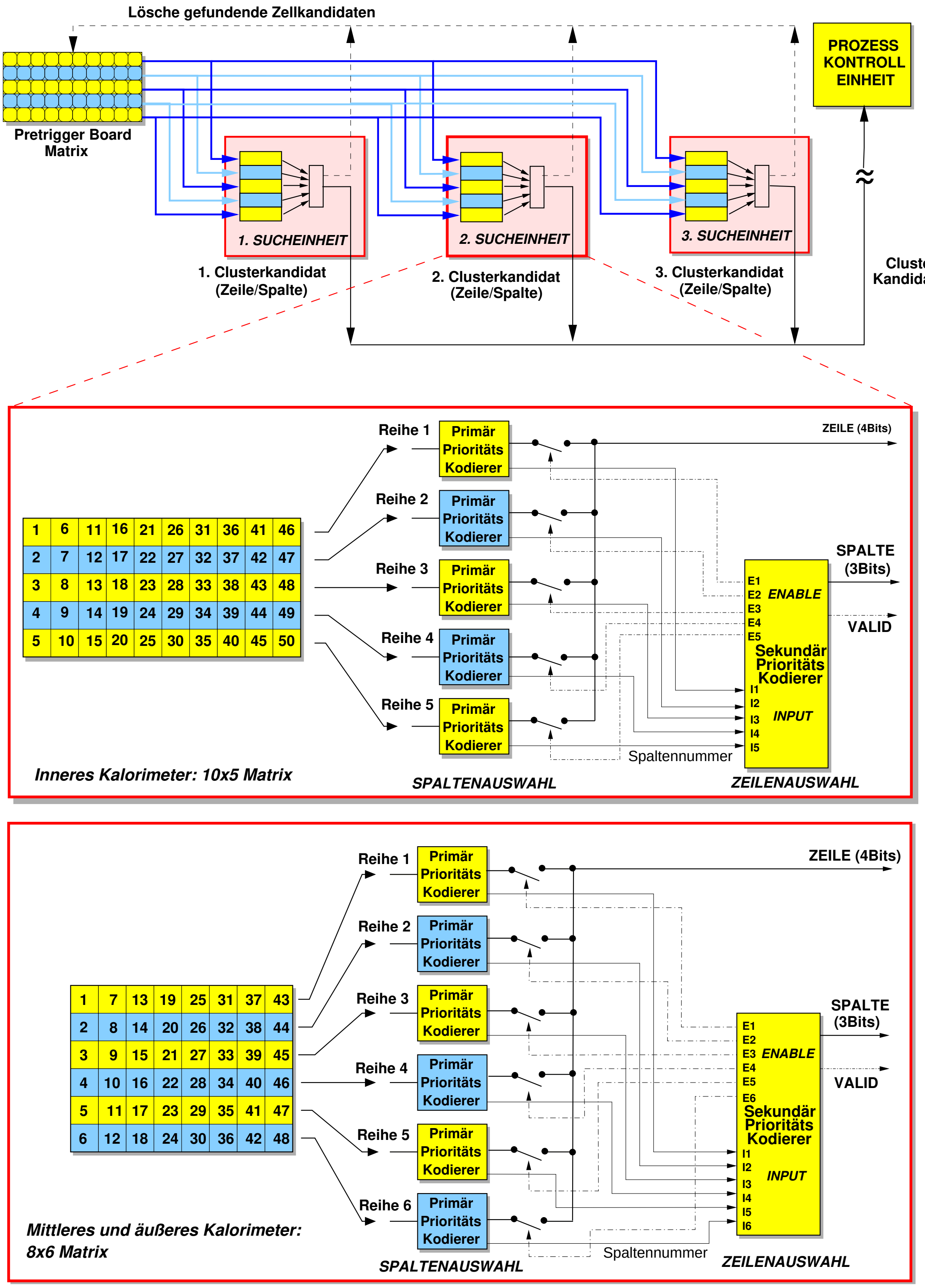


Abbildung 4.16: *Selektionseinheit des LMFU. Zur Auswahl maximal dreier Kandidaten benutzt die LMFU drei hintereinander geschaltete Selektionseinheiten, die jeweils einen, als lokales Maxima markierten, Kandidaten anhand eines Prioritätsmusters auswählen. Jede dieser Selektionseinheiten ist ihrerseits aus zwei Untereinheiten aufgebaut – einem System aus Primär-Spalten-Selektoren zur Auswahl der Zelle höchster Priorität innerhalb einer Zeile und einem Sekundär-Zeilen-Selektor zur Auswahl der Zeile mit der höchsten Priorität. Dargestellt ist im oberen Drittel die gesamte Selektionseinheit, im mittleren und unteren Drittel eine Selektionseinheit für ein Board des inneren Kalorimeters bzw. für ein Board des mittleren und äußeren Kalorimeters.*

Hat die erste Selektionseinheit einen Kandidaten gefunden, so wird der Eintrag dieses Kandidaten in der Matrix gelöscht und die zweite Selektionseinheit beginnt nun ihrerseits die Suche nach einem Kandidaten. Findet auch sie einen Kandidaten, so wird der Eintrag dieses Kandidaten ebenfalls in der Matrix gelöscht, bevor die dritte Selektionseinheit nach einem weiteren Kandidaten sucht.
Insgesamt kann die LMFU so bis zu drei Kandidaten auswählen, deren Zeilen- und Spalteninformation vor der Weiterleitung an die Prozesskontrolleinheit in die Adresse der Zelle umgewandelt werden.

4.3.4 Das Pretrigger Board Lookuptablesystem

Das Lookuptable System des ECAL Pretrigger Boards stellt den zentralen Datenprozessor dar, der alle Berechnungen zur Erzeugung der Pretrigger Nachricht durchführt. Es bekommt als Eingabe von dem Ereignis Speicher und dem Message Multiplexer den Energiewert der zentralen Zelle eines Clusters, die Energiewerte seiner 8 Nachbarzellen (3×3 Cluster) sowie die Koordinaten der zentralen Zelle.
Der Pretrigger erlaubt neben der Energieberechnung in einem 3×3 Cluster (Nonett) auch eine Berechnung nur über die fünf Zellen des zentralen Kreuzes (vgl. Abbildung 4.17). Diese Kreuz-Einstellung wurde für die Datennahmeperiode 2000 verwendet, da man auf diese Weise weniger anfällig für rauschbehaftete Zellen ist. Sie wirkt sich nur auf die Gesamtenergiesumme nicht aber auf die Schwerpunktsberechnung aus, da für die Schwerpunktsberechnung die Eckzellen des Nonetts generell nicht berücksichtigt werden.

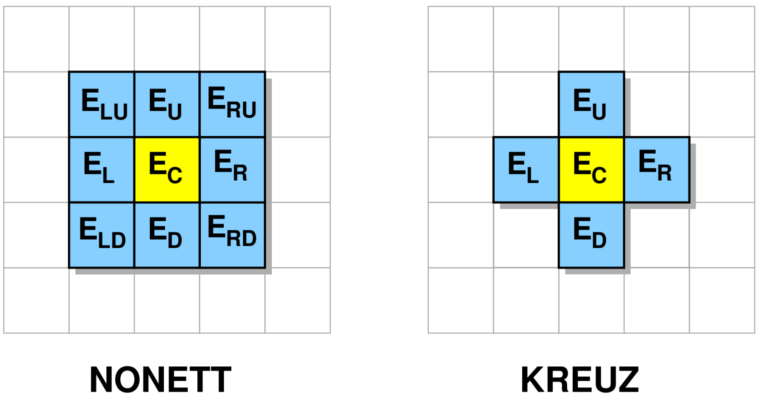


Abbildung 4.17: *Nonett- und Kreuz-Setup des ECAL Pretriggers. Für den Nonett-Setup werden die neun Zellen der 3×3-Zellmatrix für die Energiesummation verwendet, für den Kreuz-Setup nur die 5 Zellen des zentralen Kreuzes. Die restlichen Energien werden auf Null gesetzt. Die Clusterschwerpunktsberechnung ist davon unabhängig da sie in beiden Setups nur die fünf Zellen des zentralen Einstellungen berücksichtigt.*

Die Berechnungen der Lookuptables können in fünf Bereiche eingeteilt werden:

- Berechnung der Gesamtenergie E_{TOT} des Clusters
- Berechnung der x- und y-Position des Clusterschwerpunktes und Kodierung in die FLT Koordinaten ξ und η
- Extrapolation des Clusters in die Superlage TC02 unter Berücksichtigung der Kinematik und Berechnung der dortigen Suchregion

- Berechnung des Orts eines möglichen Bremsstrahlungsphotons und Rekonstruktion der Bremsstrahlungsclusterenergie
- Die Triggerentscheidung, ob der Cluster oberhalb einer gewählten Schwelle liegt und somit als Spurkandidat an den FLT weitergereicht werden soll.

Abbildung 4.18 zeigt das Schema des ECAL Pretrigger Lookuptable Systems.

4.3.5 Bestimmung der Gesamtenergie des Clusters

Die Lookuptables T0 bis T7 sowie T13 dienen der Bestimmung der Gesamtenergie des Clusters:

$$E_{TOT} = \sum_{i=1}^{9} E_i \ . \tag{4.10}$$

Dabei werden zunächst jeweils die Energien der beiden oberen (Lookuptable T0) und unteren Ecken (T1) sowie die Energien der beiden vertikalen (T2) und horizontalen Nachbarn (T3) der zentralen Zelle addiert und dann schrittweise diese Energien zur Gesamtsumme vereinigt (T4 bis T7 und T13). Bis auf Lookuptable T13 wird die gleiche Kodierung der Energiewerte wie im Readout Board verwendet (vgl. Abschn. 4.2.3). Da die in T13 bestimmten Gesamtclusterenergiewerte innerhalb der Pretrigger Nachricht an den First Level Trigger weitergegeben werden, findet in T13 neben der Gesamtsummation auch eine Transformation der Energiekodierung in das Kodierungsschema des First Level Triggers statt. Die Gesamtenergie wird vom First Level Trigger in den Track Finding Units zur Extrapolation der Spuren und in der Track Parameter Unit zum Vergleich mit dem bestimmten Impuls benötigt. Der First Level Trigger besitzt im Gegensatz zum Pretrigger System eine von der Position unabhängige, einheitliche Kodierung der Energie (siehe auch [Ger 98]).

4.3.6 Bestimmung des Clusterschwerpunktes

Die Bestimmung des Schwerpunktes (COG)[18] der Cluster erfolgt durch Gewichtung der Energiedepositionen mit ihrer Position – es werden jedoch nur die Zellen des zentralen Kreuzes (vgl. Abbildung 4.17) für die Bestimmung des Schwerpunktes berücksichtigt:

$$X_{COG} = \sum_{i=1}^{n} \frac{x_i E_i}{E_{TOT}} \ . \tag{4.11}$$

Die Bestimmung beginnt zunächst mit der Bestimmung des Energieunterschiedes der beiden vertikalen und horizontalen Nachbarzellen der zentralen Zelle (T9 bzw. T8). Zusammen mit der Energiesumme der mittleren Zeile bzw. Spalte wird daraus die Asymmetrie ΔX und ΔY des Clusters in x und y bestimmt (T11 bzw. T10):

$$\Delta X = \frac{E_r - E_l}{E_r + E_c + E_l} \qquad \text{bzw.} \qquad \Delta Y = \frac{E_u - E_d}{E_u + E_c + E_d} \ . \tag{4.12}$$

[18] *Center Of Gravity* — engl. für Schwerpunkt

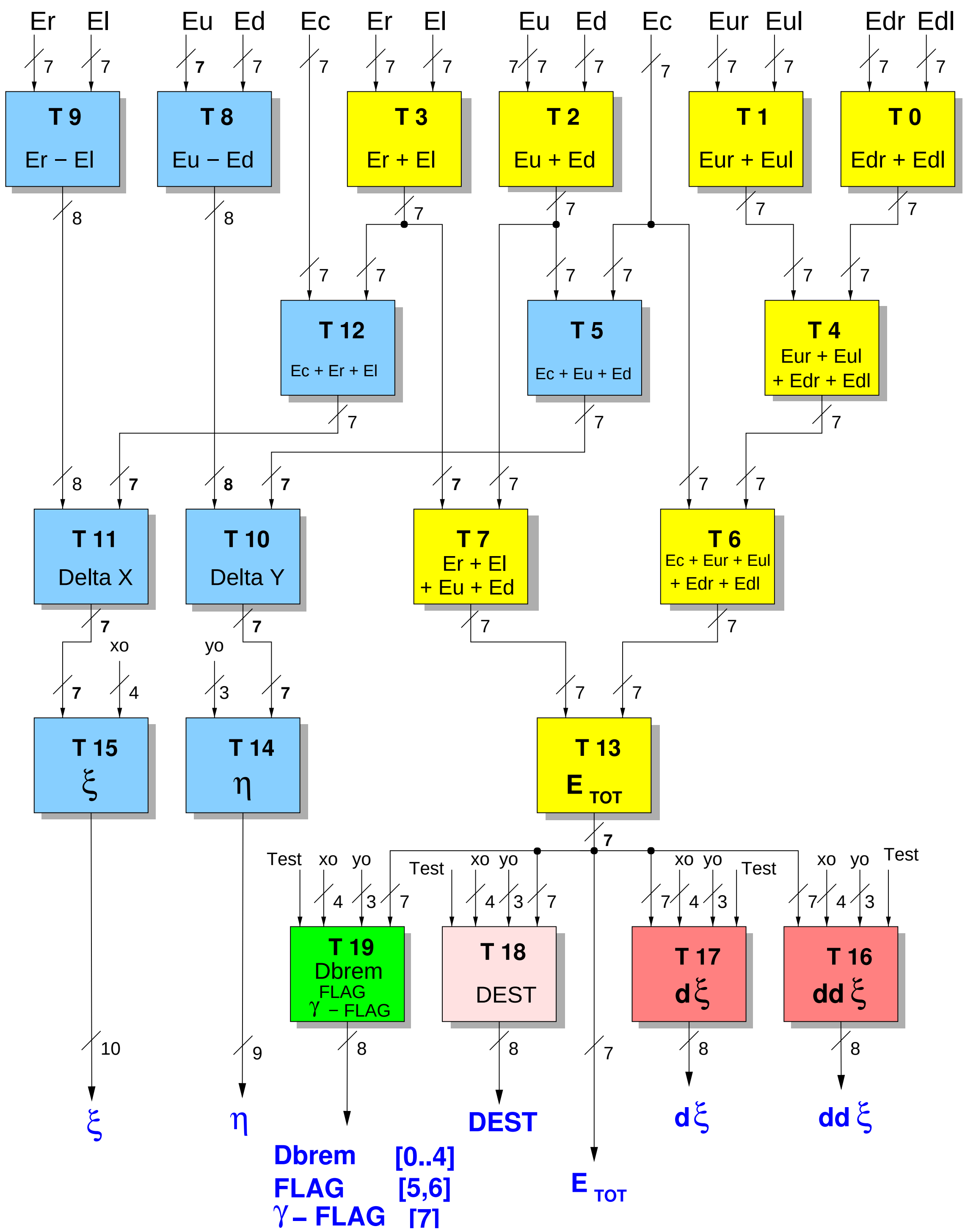


Abbildung 4.18: *ECAL Pretrigger Lookuptable Schema. Das Lookuptablesystem ist in fünf Stufen aufgeteilt, um seine Ergebnnisse zu ermitteln. Es gliedert sich in einen Bereich zur Bestimmung der Gesamtenerhie mittels Summation der Einzelenergien E_{TOT} des Clusters (T0 – T7 und T13), einen Bereich zur Bestimmung des Schwerpunktes, kodiert in den FLT Koordinaten ξ und η (T8 – T12, T14 und T15), sowie Lookuptables zur Extrapolation des Clusters in die Superlage TC02 (T16 – T18). In Lookuptable T19 erfolgt die Bestimmung der Position möglicher Bremsstrahlungscluster und die Triggerentscheidung, ob die Clusterenergie oberhalb der Triggerschwelle liegt.*

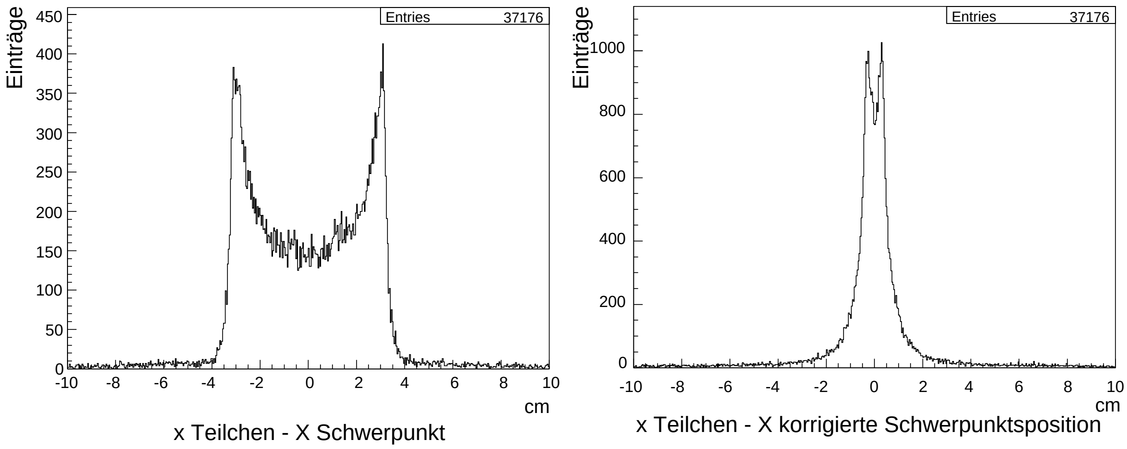


Abbildung 4.19: *S-Shape-Korrektur der Schwerpunktsbestimmung im Rekonstruktionsprogramm CARE. Links ist der Abstand der wahren Position zur rekonstruierten Position in x ohne Korrektur, rechts nach Anwendung der S-Shape-Korrektur dargestellt [Igo 97].*

Anschließend wird mit Hilfe der x- bzw. y-Position der Zellmitte der zentralen Zelle (X_{CC} bzw. Y_{CC}) die exakte Schwerpunktsposition bestimmt (T14 und T15):

$$X_{COG} = X_{CC} \cdot \Delta X \qquad \text{und} \qquad Y_{COG} = Y_{CC} \cdot \Delta Y \; . \tag{4.13}$$

Diese Art der Bestimmung des Schwerpunktes setzt einen linearen Abfall der räumlichen Energieverteilung voraus, wohingegen die wirkliche Energieverteilung eine vom Abstand zur Schauerachse exponentiell abfallende Verteilung darstellt. Die Bestimmung stellt somit nur eine Näherung und nicht die beste Abschätzung für den Schwerpunkt des Clusters dar [Igo 97]. Um diesen Effekt zu berücksichtigen, muss der Schwerpunkt mit der folgenden Beziehung korrigiert werden:

$$X_{COG} = A \cdot sinh(B \cdot [X_{COR} - X_{CC}]) + X_{CC} \; . \tag{4.14}$$

Dabei sind X_{COR} die korrigierte Schwerpunktskoordinate und A und B zwei Parameter die von der Schauerform und der Zellgröße abhängen. Diese Korrektur wird auch als *S-Shape-Korrektur* bezeichnet. Sie wird ebenfalls in dem Rekonstruktionsprogramm CARE verwendet [Vil 97]. Abbildung 4.19 zeigt die Auswirkungen dieser Korrektur auf die Auflösung innerhalb von CARE.
Statt der Schwerpunktsposition X_{COG} und Y_{COG} kodiert der First Level Trigger die Koordinaten in ξ und η. η ist definiert als:

$$\eta = \frac{Y_{COG}}{Z_{ECAL}} \; , \tag{4.15}$$

ξ entspricht dem oberen Rand des First Level Trigger Clusters in x-Richtung im ECAL. Der First Level Trigger Cluster ist ein Cluster dessen Breite in der Variablen w[19] kodiert ist und der zentriert um den Clusterschwerpunkt liegt (vgl. Abb. 4.20):

$$\xi_{ECAL} = X_{COG} + 0,5 \cdot w \; . \tag{4.16}$$

[19] *width* — engl. für Breite. w ist die Größe des Clusters in cm. Der FLT Parameter W ist dagegen ein 2-Bit-Wert, der für Elektronen fest auf 0 gesetzt ist.

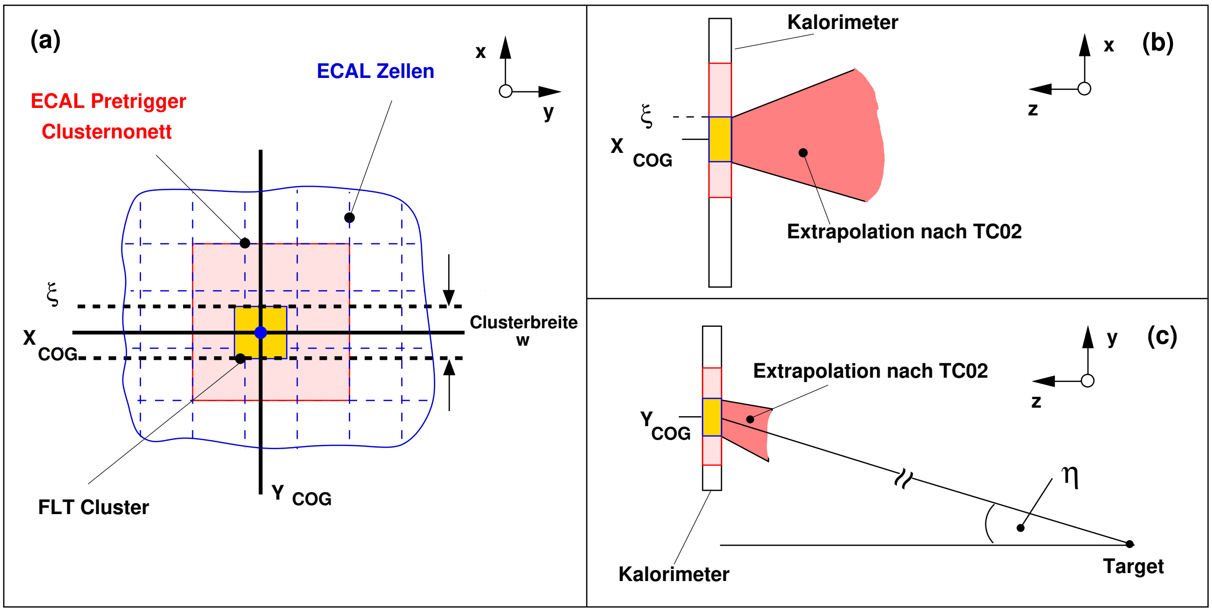


Abbildung 4.20: *Bedeutung des FLT Parameters ξ und η. Zur Kodierung der FLT-Nachricht wird in x-Richtung statt des Clusterschwerpunkts der obere Rand des First Level Trigger Clusters verwendet ((a) und (b)). η ist als Öffnungswinkel der Spur in y-Richtung definiert ((a) und (c)).*

Die Clusterbreite berücksichtigt die Ortsauflösung des ECAL Pretriggers bei der Clusterrekonstruktion. Die Breite kann als Vielfaches der Kalorimeterzellbreite w_o mit dem Skalierungsfaktor γ parametrisiert werden:

$$w = \gamma \cdot w_o \; . \tag{4.17}$$

Für die Datennahmeperiode 2000 wurde w auf $w = 0,5 \cdot w_o$ gesetzt.
Da die Track Finding Unit in der Superlage TC02, welche die ECAL Pretrigger Nachricht empfängt, in einigen ihrer Lookuptables aus technischen Gründen nicht zwischen Myon- und Elektronenspuren unterscheiden kann, und somit nicht weiß, ob die Nachricht vom Kalorimeter oder von der Superlage MU1 aus gesendet wurde, muss die Position von ξ in die Superlage MU1 extrapoliert werden:

$$\xi_{MUON} = \xi_{ECAL} \cdot \frac{Z_{MUON}}{Z_{ECAL}} \; . \tag{4.18}$$

Dabei muss auch beachtet werden, dass im Allgemeinen jede Superlage eine eigene Kodierungsart zur Kodierung der Werte besitzt und dementsprechend die Kodierung und Dekodierung der Werte unter Berücksichtigung der Superlage erfolgt. Für ξ werden deshalb die Werte anhand des Kodierungsschema der Superlage MU01 kodiert.
Für η ist dies in soweit irrelevant als η als Winkel kodiert ist und somit unabhängig von der Superlage ist.[20]

[20] Dies ist nur zum Teil richtig. Bei der Kodierung der verschiedenen Größen im FLT spielt die Superlage auch insofern eine Rolle als deren Granularität das Binning und somit die Kodierung beeinflusst. Der absolute Wert von η ist zwar unabhängig von der Superlage, bei Kodierung und Dekodierung muss jedoch die Superlage – in diesem Fall also MU1 statt ECAL – verwendet werden.

4.3.7 Extrapolation zur Superlage TC02

In den Lookuptables T16 und T17 erfolgt die Extrapolation des Spurkandidaten in die unmittelbar vor dem Kalorimeter liegende Superlage TC02 und die Kodierung des Suchbereichs in den FLT Variablen $d\xi$ und $dd\xi$. Die Extrapolation findet unter Berücksichtigung der möglichen Kinematik eines Kandidaten statt. Im ECAL Pretrigger ist noch keine Entscheidung möglich, welche Ladung das zugehörige Teilchen hatte, und somit, ob der Cluster von einem Teilchen stammt, das im Magneten nach außen oder nach innen abgelenkt wurde. Die extrapolierte Suchregion in TC02 muss deshalb so groß sein, dass sie beide Möglichkeiten einschließt.

Extrapolation in x-Richtung

Unter der Annahme, dass die vom FLT gesuchten Spuren vom Target kommen,[21] kann man unter Berücksichtigung der gemessenen Clusterenergie und somit näherungsweise des Impulses des Teilchens[22] den Bahnbereich auf zwei Spurbereiche für die beiden Ladungen einengen (vgl. Abb. 4.21). Die Kodierung des Suchbereichs erfolgt neben der x- und y-Position in ξ und η mittels der drei Variablen $d\xi$, $dd\xi$ und w: Die Größe der Suchregion wird durch $dd\xi$ und w festgelegt, die Position durch $d\xi$.
Für die korrekte Abschätzung der Größe des Suchfensters Δx_{ROI} in TC02 muss die Rekonstruktionsgenauigkeit des Ortes und der Energie berücksichtigt werden. Die Größe des Suchfensters bestimmt sich deshalb aus dem energieabhängigen Teil $dd\xi$, der die Kinematik sowie die Energieauflösung des Pretriggers berücksichtigt, und dem ortsabhängigen Teil w, der die Ortsauflösung des Pretriggers berücksichtigt:

$$\Delta x_{ROI} = w + dd\xi \ . \tag{4.19}$$

Die Größe $dd\xi$ wird in dem 9-Bitwort $DDXI$ an den First Level Trigger weitergereicht, die Breite w ist als 2-Bitwort W kodiert. Es muss jedoch beachtet werden, dass W für die Pretrigger Nachricht vom ECAL fest auf $W = 0$ kodiert ist und nicht durch das Lookuptablesystem und damit die Extrapolationsberechnungen verändert werden kann. Da die entsprechenden Lookuptables in den TFUs, die w verwenden, den Kalorimeterbereich, von dem die Nachricht kam, aus der ξ und η Position kennen, kann jedoch jeweils ein vom Kalorimeterbereich abhängiger Wert gewählt werden (Gleichung 4.17).
Die Größe $d\xi$ definiert die Position des Suchbereichs als horizontale Verschiebung relativ zu einer Referenzlinie, einer Spur unendlichen Impulses, die ohne Ablenkung das Magnetfeld durchquert: $d\xi$ ist der Öffnungswinkel zwischen dem oberen Rand des Suchkegels und der Referenzspur (vgl. Abb. 4.21). $d\xi$ wird als 8-Bitwert $DDXI$ kodiert. Nähere Einzelheiten zur Kodierung der FLT-Spur finden sich in [Ger 98] und [Fle 01].
Die Ablenkung im Magnetfeld eines Teilchens mit der Ladung q, das vom Target kommt, kann durch das Integral des Magnetfeldes über den im Magnetfeld B zurückgelegten Weg dl durch

$$p_o = q \int Bdl \approx 0,672 \ GeV \tag{4.20}$$

[21] Das ist unter der Berücksichtigung der Verhältnisse zwischen dem Abstand des sekundären Vertex vom Target, der im Bereich einiger mm liegt, und der Gesamtentfernung zwischen dem Target und dem Kalorimeter bzw. der Superlage TC02, die im Bereich mehrerer Meter liegt, sowie der Auflösung des Pretriggers eine gültige Annahme.

[22] für Elektronen

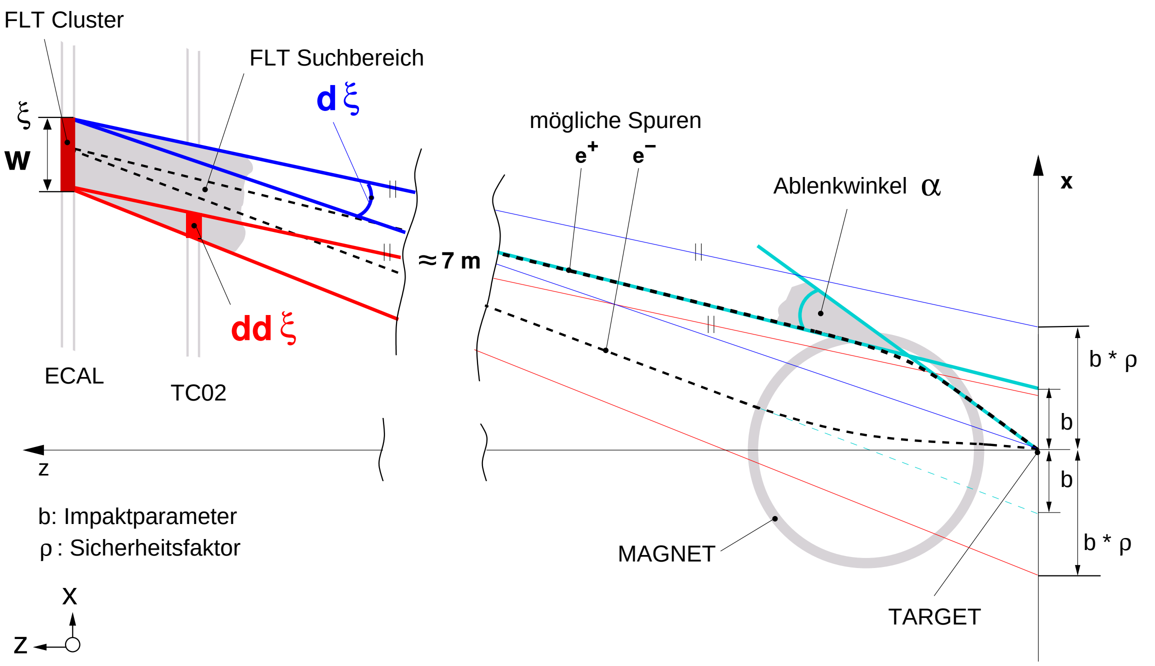


Abbildung 4.21: *Schematische Darstellung der First Level Trigger Extrapolation in x-Richtung vom Kalorimeter zur Superlage TC02: In der linken Hälfte ist die Definition von $d\xi$ und $dd\xi$ erkenntlich, die den FLT Suchbereich (in grau) definieren: $d\xi$ ist die Abweichung der oberen Suchregionsgrenze von der Referenzspur – einer Spur unendlichen Impulses – und legt die horizontale Position der Suchregion zusammen mit dem oberen Rand des FLT Clusters im Kalorimeter, ξ, fest. $dd\xi$ legt zusammen mit der Breite w der FLT Clusters im Kalorimeter die Breite der Suchregion in der Superlage TC02 fest. Da zu dieser Stufe der Extrapolation im FLT die Ladung des Teilchens noch nicht feststeht, muss die Suchregion beide möglichen Spuren enthalten. Die obere und untere Grenze des Suchbereichs wird deshalb durch den Impaktparameter b der beiden möglichen Spuren festgelegt. Der Suchbereich wird zur Sicherheit um einen Sicherheitsfaktor ρ vergrößert. Der Ablenkwinkel α und damit der Impaktparameter ist durch das magnetische Wegintegral sowie den Impuls des Teilchens bestimmt.*

beschrieben werden [Eck 96]. Damit erhält man für den Ablenkungswinkel α bzw. den Impaktparameter b der Teilchenspur nach dem Magneten mit der x-y-Ebene

$$\alpha = \frac{p_o}{p} \tag{4.21}$$

und

$$b = \frac{p_o \cdot Z_{MAGNET}}{p} = \frac{302,4\,\mathrm{GeV}\cdot\ \mathrm{cm}}{p} \tag{4.22}$$

mit der z-Position des Mittelpunktes des Magneten $Z_{MAGNET} = 450$ cm und dem Impuls p des Teilchens.
Durch Verwendung des Strahlensatzes berechnet sich $d\xi$ zu

$$d\xi_{ECAL} = \frac{b}{Z_{ECAL}} = \frac{p_o \cdot Z_{MAGNET}}{Z_{ECAL}} \cdot \frac{1}{E_{TOT}} \tag{4.23}$$

und $dd\xi$ zu

$$dd\xi_{ECAL} = (2 \cdot p_o \cdot Z_{MAGNET} \cdot \frac{1}{E_{TOT}} - W) \cdot \frac{Z_{ECAL} - Z_{TC02}}{Z_{ECAL}}\ , \tag{4.24}$$

wobei E_{TOT} die Gesamtclusterenergie[23] ist, sowie Z_{ECAL} und Z_{TC02} die z-FLT-Referenzposition des Kalorimeters bzw. der Superlage TC02 sind.
Ungenauigkeiten in der Energiemessung im Kalorimeter wirken sich so auf die Breite und Position der Suchregion in TC02 aus. Eine zu klein gemessene Energie stellt für die Extrapolation insofern kein Problem dar als sie das Extrapolationsfenster größer abschätzt als notwendig und die möglichen Spuren trotzdem innerhalb des Suchbereichs liegen. Sie kann somit nur zu einer höheren Ratenbelastung im First Level Trigger führen. Wird jedoch durch die Überlagerung mehrerer Cluster im Kalorimeter eine zu große Energie gemessen, so führt dies zu einer zu klein abgeschätzten Suchregion. Da die beiden möglichen Spuren dann außerhalb des Suchbereichs liegen können, kann dies zu Effizienzverlusten bei der Extrapolation führen.
Die Suchregion wird deshalb künstlich um den Sicherheitsfaktor ρ vergrößert, was einer Verkleinerung der Energie um den Faktor ρ entspricht:

$$E'_{TOT} = \frac{E_{TOT}}{\rho} \; . \tag{4.25}$$

$dd\xi$ und $d\xi$ berechnen sich mit dieser skalierten Energie E'_{TOT} anhand von

$$d\xi_{ECAL} = \frac{b \cdot \rho}{Z_{ECAL}} = \frac{p_o \cdot Z_{MAGNET}}{Z_{ECAL}} \cdot \frac{\rho}{E_{TOT}} \tag{4.26}$$

und

$$dd\xi_{ECAL} = (2 \cdot p_o \cdot Z_{MAGNET} \cdot \frac{\rho}{E_{TOT}} - W) \cdot \frac{Z_{ECAL} - Z_{TC02}}{Z_{ECAL}} \; . \tag{4.27}$$

Für die Datennahmeperiode 2000 betrug der Sicherheitsfaktor $\rho = 2$.
Ähnlich wie im vorherigen Abschnitt 4.3.6 bereits erwähnt, müssen auch $dd\xi$ und $d\xi$ so korrigiert werden, also ob sie ausgehend von der Superlage MU1 berechnet worden wären. Da $dd\xi$ bereits eine Strecke in TC02 kodiert, muss für $dd\xi$ keine Korrektur erfolgen. Für $d\xi$ muss jedoch eine Anpassung auf die Extrapolation von der Superlage MU1 erfolgen. Ein Vergleich der Extrapolation von der Superlage MU1 und der Extrapolation vom Kalorimeter aus ergibt:

$$d\xi_{MUON} = d\xi_{ECAL} \cdot \frac{Z_{ECAL} - Z_{TC02}}{Z_{MU01} - Z_{TC02}} \; . \tag{4.28}$$

Da sich $d\xi$ somit auf die Superlage MU1 bezieht, muss der Wert auch bezüglich dieser Superlage kodiert werden.

Extrapolation in y-Richtung

Da in y-Richtung näherungsweise keine Ablenkung der Teilchen im Magnetfeld stattfindet, verlaufen beide möglichen Spuren in erster Näherung entlang der direkten Verbindung zwischen Clusterschwerpunkt und Target. Die Suchregionen in TC02 liegen dementsprechend in erster Näherung in der y-z-Ebene symmetrisch um die zurückprojizierte y-Clusterposition (Abbildung 4.22):

$$y_{TC02} = y_{ECAL} \cdot \frac{Z_{TC02}}{Z_{ECAL}} = \eta \cdot Z_{TC02} \; . \tag{4.29}$$

[23] Für Elektronen ist ihre Energie näherungsweise gleich ihrem Impuls.

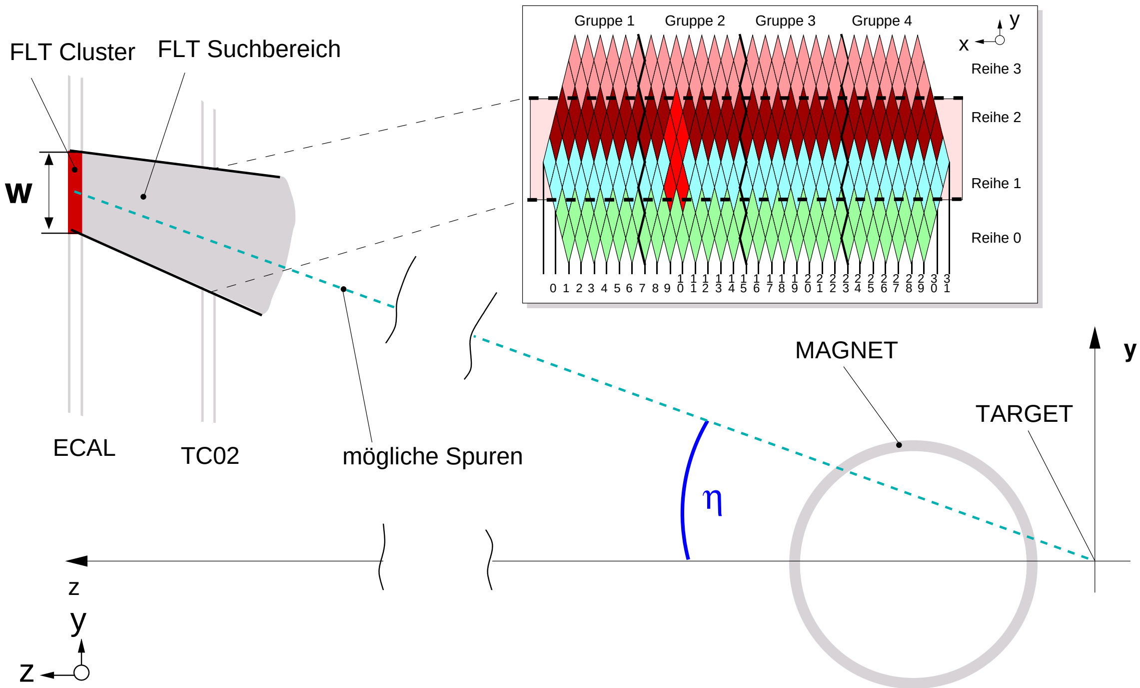


Abbildung 4.22: *Schematische Darstellung der First Level Trigger Extrapolation in y-Richtung vom Kalorimeter zur Superlage TC02: In y-Richtung wird die Größe der Suchregionen in TC02 durch die Zellgröße des entsprechenden Spurkammerbereichs in der Superlage TC02 definiert. Oben rechts ist ein Ausschnitt der Suchregionsrauten dargestellt, die durch die Kombination der drei Superlagen erzeugt werden. Für Elektronen ist die Suchregionsgröße in y-Richtung auf zwei Reihen der Koinzidenzmatrix dieser Rauten festgelegt.*

Für die Breite in y werden weniger strenge Kriterien an die Suchregion gelegt, und die Größe definiert sich im Gegensatz zu der Größe in x-Richtung alleine durch die Zellgröße y_o des entsprechenden Spurkammerbereichs in der Superlage TC02:

$$\Delta y_{ROI} = \frac{y_o}{\tan\alpha} \cdot h \tag{4.30}$$

mit dem Stereowinkel $\alpha = 4{,}58°$ und der Koinzidenzmatrixhöhe h, die für Elektronen in der Superlage TC02 $h = 2$ beträgt.

Adressierung der Ziel Track Finding Unit

Schließlich müssen noch die Ziel Track Finding Units in TC02 kodiert werden, an welche die Pretrigger Nachricht geschickt werden soll. Dies geschieht durch Überprüfung in welche TDI[24]-Bereiche die vier Eckpunkte der extrapolierten Suchregion in TC02 fallen. Die Variable $DEST$, die in Lookuptable T18 berechnet wird, enthält die veroderte Kombination aller TDI-Nummern (Abbildung 4.23).

4.3.8 Bremsstrahlungskorrektur

Ziel des Pretriggers ist der Nachweis der Elektronen des Zerfalls $J/\psi \rightarrow e^+e^-$. Für eine Optimierung des Signal-zu-Hintergrund-Verhältnis ist es wichtig, möglichst die Gesam-

[24] *TFU Destination Id* — TFU-Ziel-Kennummer

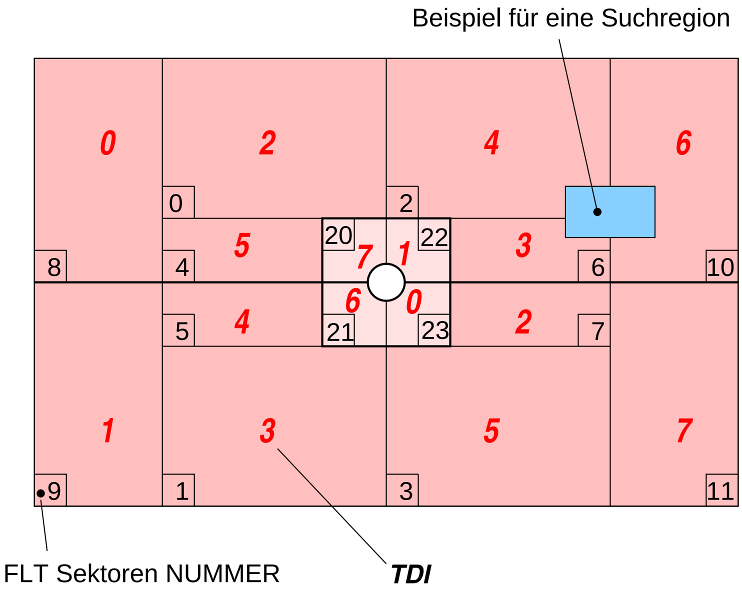


Abbildung 4.23: *First Level Trigger Ziel-Kennnummern für die Superlage TC02. Die Variable DEST wird aus den veroderten TDI Werten gebildet, in welche die vier Eckpunkte der extrapolierten Suchregion fallen.*

tenergie des Elektrons bei seiner Erzeugung zu kennen. Da das Elektron jedoch beim Durchgang durch Materie Energie in Form von Bremsstrahlung emittiert, entspricht die vom Pretrigger gemessene Clusterenergie des Elektrons im Allgemeinen nicht mehr dessen ursprünglichen Energie sondern nur noch einem Teil davon. Der Ort der Erzeugung der Bremsstrahlung kann in drei Bereiche unterteilt werden (siehe Abbildung 4.24):

- *Photonen, die nach Magneten abgestrahlt werden*, besitzen in etwa die gleiche Flugrichtung wie das Elektron nach dem Magneten und tragen somit zur durch den Pretrigger gemessenen Clusterenergie bei. Je nach Breite der örtlichen Verteilung der Bremsstrahlung liegt jedoch nur ein Teil der Energie innerhalb des vom Pretrigger untersuchten Clusterbereichs.

- *Photonen, die im Magneten abgestrahlt werden*, können je nach Ort ihrer Erzeugung und dem durchflogenen Krümmungsradius des Elektrons zu der durch den Pretrigger gemessenen Energie beitragen.

- *Photonen, die vor dem Magneten abgestrahlt werden*, werden im Gegensatz zu den geladenen Elektronen nicht durch das Magnetfeld abgelenkt und fliegen in der ursprünglichen Richtung des Elektrons vor dem Magneten geradeaus weiter. Da die Ablenkung der Elektronen im Magnetfeld und damit ihre Richtungsänderung eine Funktion der Energie ist, lässt sich so der Auftrittspunkt der Photonen aus der gemessenen Energie des Elektronenclusters abschätzen.

Die Entfernung D_{Brems} der Bremstrahlungscluster vom Zentrum der Elektronencluster ergibt sich aus dem Abstand Δz zwischen Kalorimeter und Mittelpunkt des Magneten sowie der gemessenen Clusterenergie E unter Verwendung von Gleichung 4.20 und 4.21 zu

$$D_{Brems} = \alpha \cdot \Delta z \approx \frac{585\ \mathrm{cm}}{E[GeV]} \ . \tag{4.31}$$

Da jedoch die Ladung des Leptons im Pretrigger noch nicht bekannt ist, kann der Pretrigger nicht entscheiden, ob sich der Bremsstrahlungscluster rechts oder links vom Leptoncluster befindet. Er führt deshalb eine Clusterrekonstruktion an beiden Seiten durch.

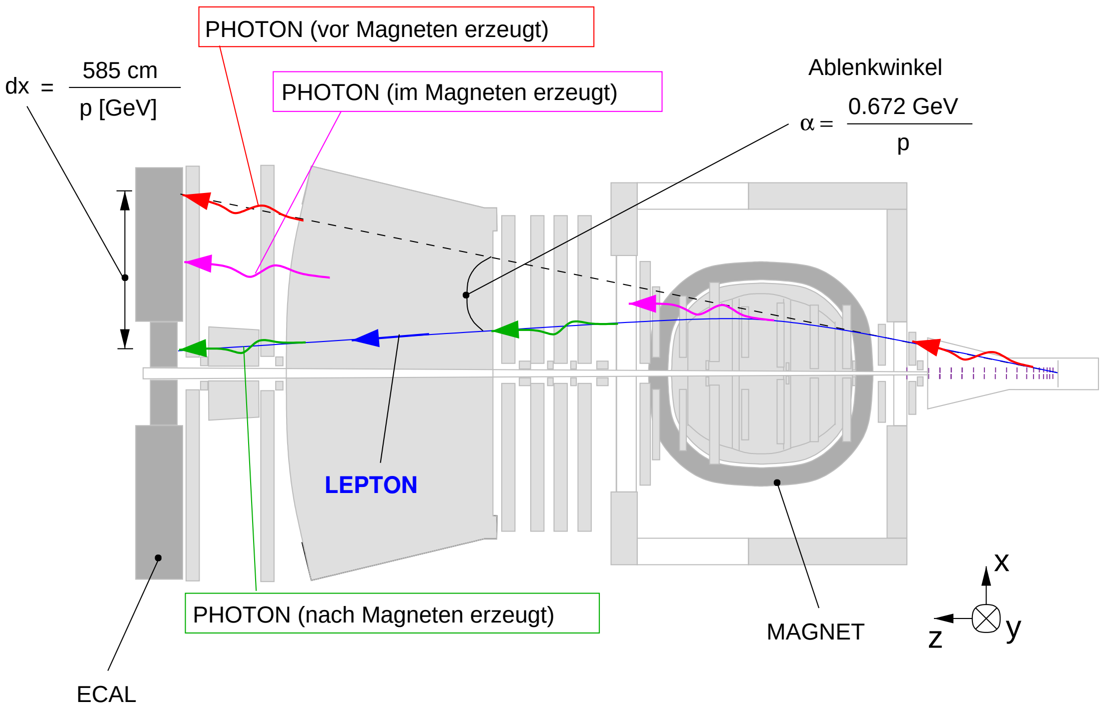


Abbildung 4.24: *Bremsstrahlungskorrektur des ECAL Pretriggers. Schematisch dargestellt sind die verschiedenen Bereiche der Erzeugung von Bremsstrahlungsphotonen. Bremsstrahlungsphotonen, die vor dem Magneten erzeugt werden, können aufgrund der festen Kinematik im Kalorimeter rekonstruiert werden.*

Eine Berechnung der Bremsstrahlungscluster kann jedoch nur in demselben Board oder in den unmittelbaren Nachbarboards erfolgen. Liegt der Cluster außerhalb dieser Grenzen, so kann er nicht rekonstruiert werden. Das gleiche gilt für die Grenzen zwischen den einzelnen Kalorimeterbereichen: Da die drei Kalorimeterbereiche für den Pretrigger separate Detektoren darstellen und keine Verbindung zwischen den Pretrigger Boards der einzelnen Kalorimeterbereiche besteht, kann eine Korrektur nur innerhalb des selben Kalorimeterbereichs erfolgen. Liegt der Bremsstrahlungscluster in einem Nachbarboard, gehört dieses Board jedoch zu einem anderen Kalorimeterbereich, so ist der entsprechende Bremsstrahlungscluster also nicht rekonstruierbar.

Die Berechnungen der Entfernung D_{Brems} in Einheiten der Zellen erfolgen in der Lookuptable T19 (vgl. Abbildung 4.18). Aus diesem Bremsstrahlungsabstand erfolgt anschließend in den Lookuptables CBL und CBR (vgl. Abbildung 4.25) die Berechnung der beiden Zellen, welche die zentralen Zellen der Bremsstrahlungscluster bilden. 6 Bit werden zur Adressierung der Zellen nach dem Schema der Abbildung 4.11 verwendet, je ein Bit zur Entscheidung, ob der Cluster im selben Board oder im Nachbarboard liegt.

Diese Koordinaten werden je nach Entfernung zur Bremsstrahlungseinheit (BRI) (vgl. Abbildung 4.13) entweder an die Prozesskontrolleinheit des eigenen Boards oder an die Prozesskontrolleinheit der beiden Nachbarboards weitergeleitet.

Die Berechnungen der Bremsstrahlungsenergie erfolgen auf die gleiche Weise wie die des eigentlichen Clusters durch Summation der Energiewerte des entsprechenden Nonetts. Für die Datennahmeperiode 2000 war die Bremsstrahlungskorrektur noch nicht aktiv.

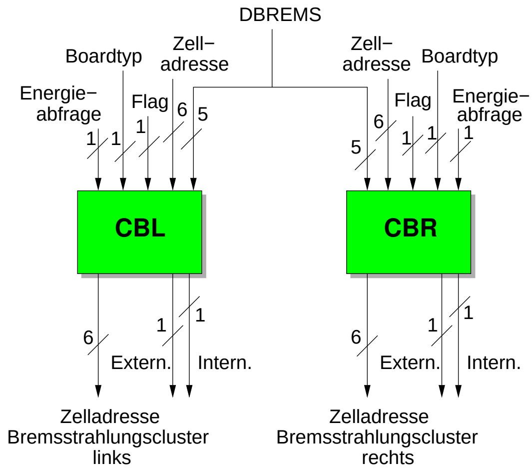


Abbildung 4.25: *Bremsstrahlungslookuptables. Die Berechnung der Adressen der zentralen Zellen der Bremsstrahlungscluster erfolgt in den Lookuptables CBL und CBR. Sie erhalten als Eingangsinformationen das Triggerbit aus LUT T19, das angibt, ob der Cluster akzeptiert wurde, (vgl. Abb. 4.18), die Entfernung DBREMS aus LUT T19 sowie die Information, ob es sich um eine Boardmatrix des inneren oder des mittleren und äußeren Kalorimeters handelt und ein Bit ob die Bremsstrahlungseinheit aktiv ist oder nicht. Die Ausgangsdaten bilden die Adressen der zentralen Zellen der Bremsstrahlungscluster anhand des Nummerierungsschemas von Abbildung 4.11 und zwei Triggerbits, ob der Cluster im selben Board oder im Nachbarboard liegt.*

4.3.9 Pretrigger Schnitte

In Lookuptable T19 erfolgt der Test, ob der Cluster oberhalb einer einstellbaren Triggerschwelle liegt. Als Triggerschnitt kann wie im Readout System zwischen einem Transversalenergieschnitt und dem $KTRIG$-Schnitt gewählt werden (vgl. Abschnitt 4.1.1). Liegt der Cluster oberhalb der Schwelle, so wird das entsprechende Triggerbit gesetzt, gegebenenfalls die Bremsstrahlungskorrekturenergie bestimmt und der Cluster an die entsprechenden Track Finding Units des First Level Trigger weitergeleitet.
Zusätzlich kann ein weiteres Triggerbit gesetzt werden, wenn der Cluster oberhalb einer zweiten Schwelle liegt. Dieses so genannte *Hard Photon Flag* zeigt dem FLT an, dass es sich um einen Cluster mit einem sehr hohen Transversalimpuls handelt. Bei der Spursuche im FLT kann, sofern dieses Bit gesetzt ist, die Nachricht auch ohne Spurkandidat in einer Superlage zur nächsten Superlage weitergegeben werden. Damit ist der First Level Trigger zusätzlich in der Lage auf die Zerfälle $B \to X\gamma$ zu triggern [Saa 96].

4.3.10 Die Pretrigger Nachricht

Sofern der ECAL Pretrigger einen Clusterkandidaten gefunden hat, der oberhalb der Triggerschwelle liegt, sendet er dessen Informationen an die entsprechenden Track Finding Units der Superlage TC02 weiter. Die Nachricht besteht aus 80 Bits, die in vier 20-Bitworten an die Track Finding Units des First Level Trigger weitergeleitet werden. Tabelle 4.1 fasst die Bitworte geordnet nach der Reihenfolge ihres Erscheinen in der Pretrigger Nachricht zusammen.

4.3.11 Übertragung der Pretrigger Nachricht

Die Pretrigger Boards sind auf neun Pretrigger Crates aufgeteilt, die jeweils über ein gemeinsames PECL-Kabel die Daten an den FLT mit einer Rate von 40 MHz senden. Da ein PECL-Kabel in der Lage ist, 20 Bit pro Taktzyklus zu übertragen, werden für die Übertragung einer Nachricht 4 Taktzyklen benötigt und die maximale Ausgangsrate

Parameter		Bitzahl & -position	
$DEST$	Ziel-TFU Nummern	8	[0..7]
$n\xi$	Verdoppelung der Suchregionsgröße (hier: 0)	1	[8]
ξ	x-Position des oberen Rands der ROI	10	[9..18]
$d\xi$	Abweich. der Spur von einer Spur unendl. Impulses	8	[19..26]
$dd\xi$	Suchregionsgröße in TC02[25]	8	[27..34]
η	Öffnungswinkel der Spur in y-Richtung	9	[35..43]
W	Breite des Clusters (hier: 0)	2	[44..45]
ALL	Treffer in jeder Superlage (hier: 1)	1	[46]
BX	BX Nummer	8	[47..54]
ID	Teilchenart (für Elektronen: 1)	2	[55..56]
P	Gesamtenergie des Clusters E_{TOT}	7	[57..63]
$FLAG$	„Hard-Photon"-Kandidat	1	[64]
E^+	Energie des Bremsstrahlungscluster rechts	7	[65..71]
E^-	Energie des Bremsstrahlungscluster links	7	[72..78]
nc	nicht benutzt	1	[79]
		$\sum$ 80	

Tabelle 4.1: *Definition der Pretrigger Nachricht. Jede Nachricht ist aus 80 Bits aufgebaut. Die Reihenfolge der Werte entspricht der Reihenfolge in der Nachricht. In der rechten Spalte ist in Klammern die Anfangs- und Endposition der Bits in der Pretrigger Nachricht angegeben.*

beträgt 10 MHz bzw. eine Pretrigger Nachricht pro BX und pro Crate.
Jeweils 2 PECL-Kabel werden über einen PECL-zu-LVDS-Transmitter zusammengefasst und über eine gemeinsame LVDS-Leitung an die TFUs geleitet. Jede LVDS-Leitung ist in der Lage, 80 Bit mit einer Rate von 25 MHz, also 2,5 Nachrichten pro BX, an die TFUs weiterzuleiten. In Anhang C ist die Aufteilung der Pretrigger Boards in die Crates und der Übertragungsweg skizziert.
Insgesamt stellt also das PECL-System den limitierenden Faktor da und die maximal mögliche Pretrigger Ausgangsrate beträgt 90 MHz bzw. neun Kandidaten pro BX. Da dies aber von einer gleichmäßigen Verteilung der Kandidaten auf die neun Crates ausgeht, liegt die wahre maximale Rate je nach Verteilung der Cluster unterhalb dieser Grenze.

4.3.12 Latenzzeit

Das Pretrigger Board arbeitet intern mit dem vierfachen Takt der BX-Rate, also mit 24 ns. Tabelle 4.2 gibt die Latenzzeiten der einzelnen Systeme und Komponenten vom Kalorimeter bis zum Eingang der TFUs in der Superlage TC02 für den Fall eines Ereignisses mit drei Clustern (dem Maximum pro BX) für ein Pretrigger Board an.
Falls drei Ereignisse mit drei Clustern pro Ereignis hintereinander in einem Pretrigger Board auftreten, so werden die Ereignisse nacheinander abgearbeitet und die Latenzzeit vergrößert sich um die Zeit von 4 BX, also 384 ns [Bal 97b]. Existiert eine noch größere Zahl an Clusterkandidaten, so werden drei davon durch die LMFU ausgewählt (vgl. Abschnitt 4.3.3).

[25]Die komplette Suchregion in TC02 beträgt $dd\xi + w$

	Komponente	$t_n - t_o$
Kalorimeter		
	Ereignis in Photoelektronen-Vervielfacher	$\leq$ 96 ns
Readout Board		
	Ereignis in ADC	$\leq$ 384 ns
	FED Lookuptable Ausgang	$\leq$ 768 ns
Pretrigger Board		
LMFU	Daten am Eingang der LMFU	840 ns
	1. Cluster am Ausgang der LMFU	1272 ns
	2. Cluster ...	1368 ns
	3. Cluster ...	1464 ns
LUT System	1. Cluster am Eingang des Lookuptablesystems	1824 ns
	2. Cluster ...	1920 ns
	3. Cluster ...	2016 ns
	1. Cluster am Ausgang des Lookuptablesystems	1944 ns
	2. Cluster ...	2040 ns
	3. Cluster ...	2136 ns
Bremstr. Korrektur	Eingang der Bremsstrahlungskorrektureinheit	1968 ns
	Ausgang der Bremsstrahlungskorrektureinheit	3024 ns
Pretrigger Ausgang	1. Cluster am Ausgang des Pretriggers	3336 ns
	2. Cluster ...	3432 ns
	3. Cluster ...	3528 ns
Verbindung zum First Level Trigger		
	Nachrichten Vervielfacher & Signalumwandlung	3763 ns
	Kabelverbindung zum FLT (4m)	3783 ns

Tabelle 4.2: *Latenzzeit des ECAL Pretriggers. Angegeben sind die Latenzzeiten für den Fall eines Ereignisses mit drei Clustern aufgeschlüsselt nach den Anteilen für das Kalorimeter, das Readout Board, das Pretrigger Board und die Verbindung zum First Level Trigger (nach [Bal 97b] und [Ger 00]).*

Zusätzlich muss beachtet werden, dass die Ausgänge von mehreren Pretrigger Boards nicht direkt mit den entsprechenden Track Finding Units (TFU) sondern mit einem gemeinsamen Bus mit den TFUs verbunden sind. Im Falle einer außerordentlichen hohen Nachrichtenrate vom ECAL Pretrigger muss dieser Bus die Nachrichten hintereinander geordnet weiterleiten. Dies führt abhängig von der Rate ebenfalls zu einer Vergrößerung der Latenzzeit.

Die Gesamtlatenzzeit des ECAL Pretrigger System beträgt $\approx$3,8 μs. Messungen während der Datennahmeperiode 2000 ergaben eine mittlere Latenzzeit des FLT von 7,9 μs. Insgesamt ergibt sich also eine mittlere Latenzzeit von 11,7 μs, die nur knapp unterhalb der maximal möglichen Latenzzeit von 12,3 μs liegt. Kommt es im FLT aufgrund einer hohen Nachrichtenrate zu höheren Latenzzeiten, so kann es zu Effizienzverlusten aufgrund der Überschreitung der Latenzzeit kommen.

4.4 Die Pretrigger Simulation EcalSIM

Im Rahmen dieser Arbeit wurde das Pretrigger Simulationspaket *EcalSIM* entwickelt, welches das ECAL Pretrigger System mit Readout und Pretrigger Board simuliert. Die Simulation arbeitet innerhalb der HERA-B Rekonstruktionsumgebung ARTE[26] und kann als separates Paket oder im Rahmen des First Level Trigger Simulationspaketes *FltSIM* [Res 01, Nör 01] betrieben werden. Es besitzt als Eingangsschnittstelle eine Verbindung zu den entsprechenden ARTE-Tabellen und als Ausgangsschnittstellen sowohl eine Benutzerschnittstelle zur Auslese der Pretrigger Nachrichten als auch eine Verbindung zum Simulationspaket *FltSIM*.

4.4.1 Anforderungen an die Simulation

Ziel der Simulation ist eine möglichst genaue Umsetzung der Hardwarekomponenten bezüglich der internen Logik und der Pretriggerberechnungen in Software. Insbesondere soll sie in der Lage sein, die Pretrigger Nachricht Bit für Bit zu reproduzieren.
Die Latenzzeit zur Bearbeitung eines Ereignisses im ECAL Pretrigger ist im Gegensatz zum restlichen First Level Trigger nahezu konstant (siehe auch Abschnitt 4.3.12). Auf eine Simulation des Zeitverhaltens und aller damit verbundenen Hardwarekomponenten wurde deshalb verzichtet. Dagegen wurde bei der Umsetzung der Clustersuch- und Clusterberechnungsalgorithmen sehr großer Wert auf eine detailgetreue Umsetzung gelegt. So erfolgen z. B. die Berechnungen des Pretriggers in der Simulation ebenfalls mit Lookuptables. Die Aufgaben der Simulation umfassen:

- *Untersuchung der Pretriggeralgorithmen*
  Mit Hilfe der Simulation wurden die im Pretrigger verwendeten Algorithmen zur Clustersuche, Clusterberechnung und Extrapolation entwickelt, überprüft und optimiert.

- *Untersuchung der Pretriggereigenschaften*
  Der Pretrigger weist gegenüber einer idealen Kalorimeterrekonstruktion sowohl in seinem Algorithmus als auch in der technischen Umsetzung des Algorithmus Limitierungen auf: Die Simulation ermöglicht die Studie des Einflusses dieser Limitierungen sowie den Einfluss der verschiedenen Triggerschnitte im Pretrigger.

- *Flexibilität*
  Die Simulation soll sowohl die Bearbeitung von MC Daten als auch online aufgezeichneter Daten ermöglichen. Darüber hinaus soll die Simulation bezüglich der Kalibration, der eingebauten Hardwarekomponenten und fehlerhaften Kanäle sowie der Pretriggerschnitte vom Benutzer individuell anpassbar sein.

- *Physikalisches Analysewerkzeug*
  Die Simulation soll für die Bestimmung von Effizienzen und für die Abschätzung von Systematiken für physikalische Analysen, die den ECAL Pretrigger beinhalten, im Rahmen des HERA-B Rekonstruktionspaket ARTE verwendbar sein.

[26] *Analysis and Reconstruction Tool and Environment* — engl. für Analyse- und Rekonstruktionsumgebung

- *Kontrollfunktionen*
  Die Simulation soll die Möglichkeit bieten, alle Einzelschritte nachzuvollziehen.

4.4.2 Realisierung der Simulation

Entscheidend für eine exakte Simulation ist die Möglichkeit, die Bedingungen, die bei einer bestimmten Datennahme vorlagen, möglichst genau mit der Simulation zu reproduzieren. Die ECAL Pretrigger Simulation erlaubt deshalb eine Anpassung mittels Umgebungsvariablen und einer *KUIP*[27]-Schnittstelle unter anderem in folgenden Punkten:

- *Schnitte im Pretrigger*
  Sowohl die Art des Triggerschnitts (*KTRIG*- bzw. E_T-Schnitt) als auch die Höhe der Schnittwerte kann individuell angepasst werden (vgl. Abschnitt 4.1.1).

- *Kalibration*
  Die Simulation erlaubt die Verwendung der Originalkalibration eines bestimmten Runs sowohl für online aufgezeichnete Daten als auch für MC Daten. Für MC Daten kann darüber hinaus auch eine idealisierte MC Kalibration verwendet werden.

- *Maskierung und Abdeckung des Kalorimeters*
  Die Abdeckung des Kalorimeters mit Readout und Pretrigger Boards (vgl. Abschnitt 4.2.1 und 4.3.1) kann individuell gewählt werden, um so verschiedene Runperioden zu reproduzieren. Darüber hinaus kann eine Maskierung toter und fehlerhafter Kanäle im Readout und Pretrigger System unter Verwendung der Datenbank erfolgen.

- *Lookuptableversion und -einstellungen*
  Die Simulation erlaubt die Verwendung aller für die Datennahme verwendeten Lookuptableversionen sowie die Wahl zwischen Nonett und Kreuz-Summation (vgl. Abschnitt 4.3.4). Damit lassen sich auch die Bedingungen älterer Runs, bei denen mit einer anderen Softwareversion gearbeitet wurde, reproduzieren.

- *Bremsstrahlungskorrektur*
  Die Bremsstrahlungskorrektur berücksichtigt die Geometrie der einzelnen Pretrigger Boards und kann wahlweise einzeln für bestimmte Boards oder für das komplette Pretrigger System ein- und ausgeschaltet werden (vgl. Abschnitt 4.3.8).

Die Simulation wurde mittels eines objektorientierten Ansatzes in C++ realisiert und umfasst knapp 15.000 Zeilen Code. Abbildung 4.26 zeigt den Aufbau der Simulation im Überblick. Eine Benutzerdokumentation findet sich in [Fla 01b].

Im Folgenden wird auf die programmiertechnische Umsetzung der einzelnen Komponenten eingegangen.

[27] *Kit for a User Interface Package* — Benutzerschnittstellen Paket, enthalten in CERN Programmbibliothek

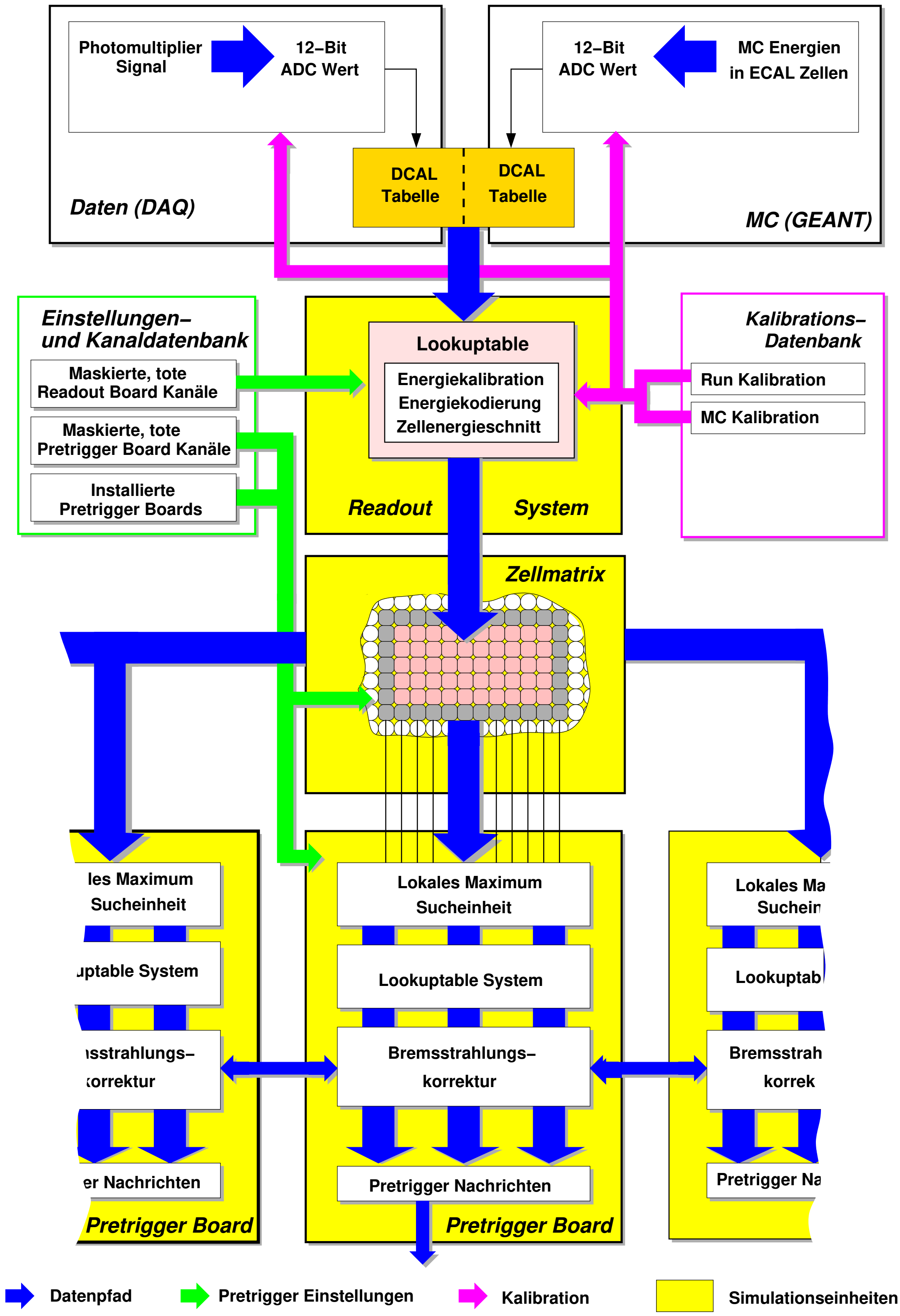


Abbildung 4.26: *Aufbau der Pretriggersimulation EcalSIM. Als Eingangsdaten verwendet die Simulation die in der DCAL Tabelle gespeicherten ADC-Werte. Zunächst erfolgt eine Bearbeitung aller Zellen mittels eines globalen Readoutsystems, das die Ausgangsdaten in die aus den einzelnen Kalorimeterzellen aufgebaute Zellmatrix speichert. Anschliessend holen sich die einzelnen, miteinander vernetzten Pretrigger Boards die dem Board zugehörigen Daten und führen die Clustersuche und -rekonstruktion durch.*

4.4.3 EcalSIM Framework

Grundzüge objektorientierter Programmierung

Das zentrale Konzept objektorientierter Programmierung liegt in der möglichst natürlichen Beschreibung der in dem Programm behandelten Gegenstände. Die Beschreibung eines Gegenstandes umfasst die Eigenschaften, die ein Gegenstand besitzt, und die Aktionen, die man mit ihm durchführen kann. Die Eigenschaften werden durch die Variablen beschrieben, die so genannten *Attribute*. Die Aktionen – auch *Methoden* genannt – sind Funktionen, die eine Aktion mit dem Gegenstand definieren. Als *Klasse* bezeichnet man die Gesamtmenge an Attributen und Methoden eines Gegenstandes. Als *Objekte* oder *Instanzen* werden Manifestationen dieser durch die Klasse definierten Gegenstände bezeichnet. Jedes dieser Objekte besitzt seine eigenen Werte für die Attribute, die seinen eigenen Zustand beschreiben.
In der Simulation *EcalSIM* stellen die einzelnen Kalorimeterzellen Instanzen der Klasse *EcalFeCh* dar, die Pretrigger Boards Instanzen der Klasse *EcalPretriggerBoard* und die zu bearbeitenden Cluster Instanzen der Klasse *EcalCluster*.
Den programmiertechnischen Rahmen der Pretriggersimulation bildet die sogenannte *Zellmatrix* aus Kalorimetermodulen, die je nach Kalorimeterbereich in 1 bis 25 Zellen aufgeteilt werden. Nach Aufbau der Matrix werden die per Datenbankfile ausgewählten Pretrigger Boards dynamisch mit den ihnen zugehörigen zentralen Zellen und Randzellen sowie gegebenfalls mit den beiden Nachbarboards für die Bremsstrahlungskorrektur verbunden.
Bei der Bearbeitung eines Ereignisses werden zunächst alle Zellen des Readout Systems abgearbeitet und die Ausgangsinformationen der einzelnen Zellen in der Matrix gespeichert. Anschließend erfolgt nacheinander eine Bearbeitung aller Pretrigger Boards. Jedes Pretrigger Board ist dabei wie in der Hardware in der Lage, maximal drei Cluster zu bearbeiten.
Werden ein oder mehrere Cluster vom Pretrigger Board akzeptiert, so werden die entsprechenden Pretrigger Nachrichten in Instanzen der Klasse *l1sFLTMessage* gesammelt, welche die Schnittstelle zur First Level Trigger Simulation FltSIM darstellt.

4.4.4 Eingangsdaten

Die Simulation verwendet wie die Hardware die 12-Bit ADC-Werte der einzelnen Kanäle als Eingangsdaten. Die ADC Daten sind in der ARTE Tabelle der digitalisierten ADC-Kalorimeterinformationen – der DCAL[28]-Tabelle – gespeichert. Je nach Datensatz werden diese Tabellen unterschiedlich gefüllt. Im Falle von MC-Daten erfolgt das Füllen der einzelnen ADC-Informationen im Digitalisierungsschritt der GEANT[29]-Simulation, der eine Energieverschmierung durchführt und die MC-Energien der einzelnen Zellen in ADC-Werte umrechnet. Für diese Umrechnung kann sowohl eine idealisierte MC-Kalibration als auch die Kalibrationswerte eines bestimmten Runs gewählt werden. Bei experimentell mit dem Detektor gemessenen Daten wird die DCAL Tabelle im Rahmen der Rekonstruktion und Ereignisbildung in der zweiten Triggerstufe mit den gemessenen ADC-Werten der einzelnen Kanäle gefüllt.

[28] *Digitized CALorimeter* – ARTE-Tabelle zur Speicherung der digitalisierten Kalorimeterinformationen [Art 96]
[29] *GEometry ANd Tracking* – Detektor Beschreibungs- und Simulationsprogramm [GEA 94].

4.4.5 Das Readout System

Für das Readout System wurde anstatt einer Umsetzung mit einzelnen Readout Boards der vereinfachte Ansatz eines Komplettsystems gewählt, das unabhängig von den Boardgeometrien arbeitet. Da die Readout Boards die ADC-Werte für jeden Kanal separat bearbeiten und sowohl die einzelnen Kanäle als auch die einzelnen Boards unabhängig voneinander arbeiten, stellt dies keine Beeinträchtigung dar.
Um einzelne Kanäle oder gesamte Readoutboards auszuschalten, erlaubt die Simulation die Maskierung einzelner Kanäle im Readout System. Zur Reproduktion der Verhältnisse während eines bestimmten Runs können die 'Logfiles' der Lookuptableproduktion, welche die Anzahl und Positionen der maskierten Kanäle enthalten, zur Maskierung der Kanäle verwendet werden.[30] Wird ein Kanal im Readout Board maskiert, so besitzen alle damit verbunden Pretriggerkanäle ebenfalls die Energie E=0.
Für die Umrechnung der ADC-Werte in die 7-Bit kodierte Energie finden die gleichen Funktionen Anwendung, die auch zur Erzeugung der Hardwarelookuptables verwendet werden.

4.4.6 Das Pretrigger System

Im Gegensatz zum Readout System ist die Aufteilung des Kalorimeters in verschiedene Pretrigger Boards für eine exakte Simulation essentiell. Jedes Pretrigger Board ist mit einer bestimmten Anzahl von Zellen verbunden, die je nach Position eine zentrale Zelle oder eine Randzelle des Boards darstellen und vom Pretrigger Board unterschiedlich gehandhabt werden (vgl. Abschnitt 4.3.1). Darüber hinaus existieren gewisse Kriterien bezüglich der Auswahl und der Anzahl zu verarbeitender Cluster pro Board und Ereignis. Für das Pretrigger Board wurden deshalb die Zellbereiche berücksichtigt, welche die Pretrigger Boards jeweils bearbeiten, das Kalorimeter in die entsprechenden Pretrigger Boards unterteilt, und jedem Board die entsprechenden Zellen zugeordnet (vgl. Abschnitt 4.3.1).

Installierte Boards und Maskierung fehlerhafter Kanäle

Ebenso wie das Readout System erlaubt auch das Pretrigger System eine Wahl der installierten Boards und die Maskierung fehlerhafter oder nicht funktionierender Kanäle. Bei der Maskierung der Kanäle im Pretrigger Board muss jedoch zwischen verschiedenen Arten der Maskierung unterschieden werden: Ein Kanal kann als zentraler Kanal oder als Randkanal maskiert werden. Ist eine Zelle als Randkanal auf dem einen Pretrigger Board maskiert, so bedeutet dies nicht, dass diese Zelle auch auf den anderen, mit ihr verbundenen, Pretrigger Boards maskiert ist. Zur Maskierung der Pretrigger Kanäle können wie im Readoutsystem die 'Logfiles' der Datennahme verwendet werden.[30]

Lokales Maxima Sucheinheit

Nachdem die Pretrigger Boards sich die Zellinformationen der zugehörigen Zellen aus der Zellmatrix geholt haben, werden sie zunächst zur Clustersuche an die Sucheinheit zur Bestimmung des lokalen Maximas weitergeleitet. Zur Simulation dieses Moduls erfolgte

[30] Eine Umsetzung mittels eines Datenbanksystems wäre wünschenswert. Dies wurde jedoch zum Zeitpunkt dieser Arbeit von der ECAL Pretriggergruppe noch nicht realisiert.

eine exakte Umsetzung der in Abschnitt 4.3.3 diskutierten Suchalgorithmen. So wurde neben dem Algorithmus zur Bestimmung der lokalen Maxima auch der Prioritätskodierer zur Auswahl der maximal drei möglichen Cluster übernommen.

Lookuptablesystem

Eine der Hauptkomponenten innerhalb des Pretrigger Systems stellt das Lookuptablesystem im Pretrigger Board dar, das die Berechnungen aller Clusterinformationen durchführt. Um die Hardware hier möglichst exakt zu beschreiben, finden in der Simulation die gleichen Lookuptables Anwendung, die auch in der Hardware verwendet werden. Die Gesamtgröße aller Lookuptables ist allerdings so groß[31], dass es nicht praktikabel ist, sie während der Simulation dauerhaft im Hauptspeicher bereitzustellen, darüber hinaus wird pro Ereignis jeweils auch nur ein sehr kleiner Teil der Information der Lookuptables benötigt. Statt der Lookuptables finden deshalb in der Simulation die Erzeugungsfunktionen der Lookuptables Anwendung, welche die Eingangsbitwerte auf die Ausgangsbitwerte abbilden.
Die Erzeugungsfunktionen der Lookuptables lassen sich in drei Bereiche aufteilen: Im ersten Schritt werden die gebinnten Werte in Fließkommazahlen unter Verwendung der umgekehrten Kodierungsfunktionen der einzelnen Variablen zurückgerechnet. Im zweiten Schritt erfolgt die eigentliche Berechnung, die die Lookuptable durchführen soll, mit den so erhaltenen Fließkommazahlen. Im dritten Schritt wird das Ergebnis mittels entsprechender Kodierungsfunktionen wieder kodiert und als gebinnter Wert ausgegeben. Die Entwicklung dieser Funktionen stellt somit die eigentliche Entwicklung der Lookuptableberechnungen dar und beinhaltet sowohl die Berechnungen an sich als auch die Kodierung der Werte.
Um die Funktionsfähigkeit und den Einfluss der Kodierung und der Verwendung von Lookuptables zu untersuchen, erlaubt die Simulation zusätzlich parallel dazu auch eine Berechnung der Clusterinformationen unter Umgehung der Kodierungsfunktionen. Diese Art der Berechnung – auch als *idealer Pretriggeralgorithmus* bezeichnet – beinhaltet somit nur die reinen Pretriggeralgorithmen und stellt Referenzwerte für die Lookuptableberechnungen dar.

4.4.7 Ausgangsdaten: Die Pretrigger Nachricht

Die Simulation *EcalSIM* ist in der Lage, die Pretrigger Nachricht an den First Level Trigger bitgenau zu erzeugen, d. h. die kodierten Variablen wie $\xi, \eta, d\xi$ und $dd\xi$ (vgl. 4.1) exakt zu reproduzieren.
Neben dieser normalen Pretrigger Nachricht (vgl. Tabelle 4.1) enthält die Nachricht an den First Level Trigger eine ganze Reihe weiterer Informationen, die in der Hardware Nachricht nicht mit enthalten sind. Im Einzelnen sind dies unter anderem:

- *Pretrigger Board Informationen*
  Zu den Pretrigger Board Informationen gehören unter anderem Informationen über die Position des Clusters, das Readout und das Pretrigger Board, von dem der Cluster akzeptiert wurde sowie die Anzahl maskierter Zellen des Clusters.

[31] Die Lookuptables des Readout und des Pretrigger Systems benötigen unkomprimiert je etwa 74 MByte Speicherplatz

- *Cluster Informationen*
  Wie in Abschnitt 4.4.6 erwähnt, erlaubt die Simulation auch eine Berechnung mittels Fließkommazahlen. Die so ermittelten Clusterinformationen sind ebenfalls in der Pretrigger Nachricht enthalten.

- *Extrapolationsinformationen*
  Die Simulation berechnet die Koordinaten der Grenzen der Extrapolationsregion in TC02 und übergibt sie als Teil der Pretrigger Nachricht.

Die Simulation übergibt eine Liste dieser Pretrigger Nachrichten zusammen mit der Anzahl akzeptierter Cluster an den Benutzer bzw. die Simulation des First Level Triggers. Nähere Einzelheiten zu den in der simulierten Pretrigger Nachricht enthaltenen Variablen finden sich in [Fla 01c].

4.4.8 Kontrollfunktionen

Die Simulation ist in der Lage, jeden einzelnen Bearbeitungsschritt von der Kalibration über die Clustersuche bis hin zur Clusterrekonstruktion für den Benutzer anzuzeigen und ermöglicht damit die genaue Untersuchung von eventuellen Abweichungen der Simulation von der Hardware sowie die Möglichkeit der Untersuchung, warum ein gewisser Cluster das Pretrigger System ausgelöst hat bzw. nicht ausgelöst hat. Nähere Einzelheiten zur Steuerung von EcalSIM finden sich in [Fla 01b].

4.4.9 Hardwaretest

Um einen schnellen Test der Funktionsfähigkeit der kompletten Hardwarekette vom Readout Board bis zu den Track Finding Units zu ermöglichen, bietet die Simulation die Möglichkeit, aus beliebigen MC-Daten ein Datentestfile zu erzeugen, dass über die VME-Schnittstelle per Lookuptables in die Readout Boards geladen werden kann.
Zum Test des Pretriggers lässt man den Pretrigger diesen Datensatz abarbeiten und liest jeweils die Pretrigger Nachrichten in der ersten Pipelinestufe der Track Finding Units der Superlage TC02 aus. Durch einen Vergleich der so ermittelten Pretrigger Nachricht mit der von der Simulation vorgegeben Pretrigger Nachricht lassen sich sehr leicht Fehlfunktionen der Hardware diagnostizieren.
Technisch wird die Einspeisung der Daten in der folgenden Weise realisiert: Zunächst erzeugt die Simulation ein Datenfile, das neben der Pretrigger Nachricht auch die ADC-Werte und Energien der zu dem Cluster zugehörigen Zellen enthält. Die Readout Board Lookuptables aller Zellen werden zunächst komplett mit der Energie Null gefüllt, sodass jedes ADC-Signal, egal welcher Größe, dem Pretrigger die Energie Null gibt. Anschließend werden die Lookuptables der Zellen, die an einem Cluster beteiligt sind, so präpariert, dass sie abhängig vom ADC-Wert zwei Werte liefern: liegt der ADC-Wert unterhalb einer wählbaren Grenze, so liefern sie den Energiewert 0 GeV, liegt er oberhalb der Grenze so liefern sie den gewünschten Energiebetrag.
Über das Schnelle Kontroll System (FCS) ist es möglich, einzelne Kanäle oder das gesamte Readout System zu steuern. Damit können nun gezielt diejenigen Zellen eingeschaltet werden, die den Pretrigger auslösen sollen. Alle anderen Zellen besitzen entweder generell die Energie Null in ihren Zellen oder bekommen maximal ein kleines Rauschsignal von

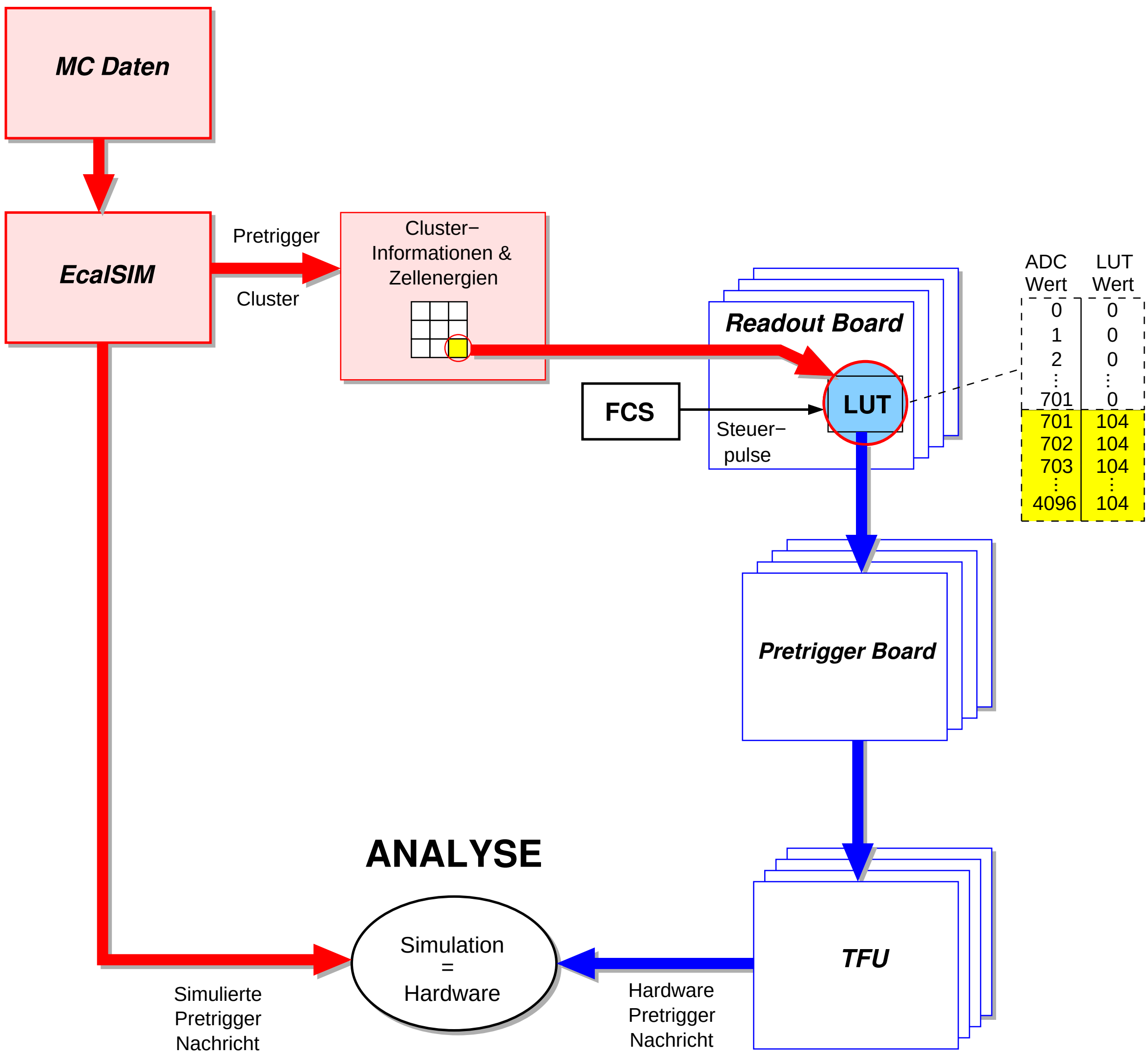


Abbildung 4.27: *Hardwaretest des ECAL Pretriggers mittels der Simulation EcalSIM. Erläuterung siehe Text.*

den ADCs, das in den Lookuptables, da es unterhalb der Schwelle liegt, ebenfalls eine Energie von Null dem Pretrigger System für die entsprechende Zelle liefert.
Schaltet man auf diese Art mehrere Cluster im Kalorimeter ein, so fängt das Pretrigger Board an, diese Cluster ganz normal – als ob es sich um physikalische Kalorimeterinformationen handeln würde – zu bearbeiten und liefert, sofern es den Cluster akzeptiert, die entsprechenden Pretrigger Nachrichten an die Track Finding Units der Superlage TC02. Abbildung 4.27 zeigt den generellen Aufbau des Hardwaretests.
Die prinzipielle Funktion des Test wurde erfolgreich getestet, ein Einbau in einen regelmäßigen Routinetest ist geplant. Da jedoch das Laden der Lookuptables relativ viel Zeit benötigt (im Bereich von Sekunden), benötigt ein systematischer Test des gesamten Kalorimeters zu viel Zeit, um ihn vor jedem Run durchzuführen und ist daher eher für einen wöchentlichen oder monatlichen Test gedacht. Dies sollte jedoch bei einer stabilen Operation des Kalorimeters vollkommen ausreichend sein.

Kapitel 5

Untersuchung der Funktion des ECAL Pretriggers

Der ECAL Pretrigger besitzt die Aufgabe, der ersten Triggerstufe Elektronkandidaten des Zerfalls $J/\psi \to e^+e^-$ für die dortige Spursuche und -rekonstruktion zu liefern.[1] Er führt dazu eine Clustersuche und -rekonstruktion im Elektromagnetischen Kalorimeter durch, extrapoliert die gefundenen Cluster in die vor dem Kalorimeter liegende Spurkammerlage TC02 und übergibt der ersten Triggerstufe neben der Clusterposition und -energie die Größe und die Position des Suchfensters in TC02.
Für eine erfolgreiche Rekonstruktion der Spuren in der ersten Triggerstufe ist dabei neben der generellen Rekonstruktion der Cluster auch die Genauigkeit der Rekonstruktion entscheidend, da sich sowohl die Orts- als auch die Energieauflösung auf die Größe und die Position des Suchfensters auswirken, und damit letzendlich auch auf die Effizienz des Pretriggers bzw. der ersten Triggerstufe.
Die größte Zahl der Pretriggercluster stammt von Untergrundereignissen. Deshalb soll der Pretrigger eine möglichst geringe Zahl an Pretrigger Cluster liefern, gleichzeitig soll er eine möglichst hohe Effizienz für den Nachweis der Elektronen des Zerfalls $J/\psi \to e^+e^-$ besitzen. Erreicht wird dies durch verschiedene Schnitte auf die Transversalenergie der gefundenen Cluster.
Da der Pretrigger eine Clusterrekonstruktion bei der vollen Ereignisrate von knapp 10 MHz innerhalb eines Zeitfensters von 3,8 μs durchführen muss, werden zum einen bei der Clusterrekonstruktion einige algorithmischen Vereinfachungen verwendet, zum anderen mussten auch bei der technischen Umsetzung des Algorithmus in der Pretriggerelektronik verschiedene Einschränkungen eingegangen werden.

Inhalt dieses Kapitels ist die Charakterisierung und Untersuchung der Funktion des ECAL Pretriggers. Dazu werden mit Hilfe der im Rahmen dieser Arbeit entwickelten Pretriggersimulation *EcalSIM* (vgl. Abschnitt 4.4) die grundlegenden Eigenschaften des Pretriggers untersucht. Zu diesen Eigenschaften gehören die Orts- und Energieauflösung des Pretriggers, die Güte der Extrapolation der gefundenen Cluster in die Superlage TC02, sowie die mit den Triggerschnitten verbundene Pretriggerrate und Pretriggereffizienz. Die Charakterisierung erfolgt mit Hilfe eines Vergleichs der rekonstruierten Pretrigger Cluster mit den Monte Carlo Informationen sowie mit dem Kalorimeterrekon-

[1] Zusätzlich kann er auch nach Photonclustern mit hohem Transversalimpuls aus radiativen B-Zerfällen suchen, für die Datennahmeperiode 2000 wurde diese Option jedoch nicht verwendet.

struktionspaket CARE als Referenzrekonstruktion um eine bessere Einschätzung der Ergebnisse zu ermöglichen.
Nach der Vorstellung des für die Untersuchung verwendeten MC Datensatzes und des Rekonstruktionspaketes CARE erfolgt zunächst eine Diskussion der Beschränkungen des Pretrigger Systems im Vergleich zu einer optimalen Rekonstruktion, wie sie CARE darstellt. Anschließend erfolgt die Untersuchung der Einflüsse der verschiedenen Faktoren auf die Orts- und Energieauflösung sowie die Bestimmung der Orts- und Energieauflösung des ECAL Pretrigger Systems und des Rekonstruktionspaketes CARE in Bezug auf die Monte Carlo Informationen. Im zweiten Teil des Kapitels wird ausgehend von der Orts- und Energieauflösung zunächst der Extrapolationsalgorithmus und die Effizienz der Extrapolation näher untersucht, bevor zum Abschluß des Kapitels die Untersuchung der Triggerschnitte und deren Auswirkungen auf die Zahl der Pretriggerkandidaten, auf die Pretriggerrate und insbesondere auf die Effizienz des Pretriggers erfolgt.

5.1 MC Simulation und Referenzrekonstruktion

5.1.1 Monte Carlo Datensatz

Während der Datennahmeperiode 2000 erfolgte der überwiegende Teil der Messungen bei einer Wechselwirkungsrate von 5 MHz. Für die Untersuchungen der Auflösungen, der Extrapolation in die Superlage TC02, sowie der Triggereffizienzen wurde deshalb ein Ereignis des direkten Zerfalls $J/\psi \to e^+e^-$ mit poissonverteilten Untergrundereignissen (im Mittel ein halbes Ereignis) überlagert [Hul 01]. Als Detektorgeometrie wurde die Geometrieversion 99-08-11 [Geo 01] verwendet, die den Aufbau des Detektors im Juli 2000 widerspiegelt.
Zur Erzeugung von Ereignissen findet bei HERA-B eine Kombination der Monte Carlo Generatoren PYTHIA [Sjö 94] und FRITIOF [Pi 92] Anwendung. Untersuchungen haben gezeigt, dass die Kinematik der J/ψ-Mesonen realer Daten durch diese beiden Ereignisgeneratoren nicht vollkommen korrekt beschrieben wird, sondern ein leicht unterschiedliches p_T und x_F-Spektrum aufweisen [Iva 99]. Zum Angleich der Monte Carlo Daten an die realen Daten diente eine Messung des Experimentes E789 [Jan 95] am FNAL[2] [FNA 97], bei welcher der Wirkungsquerschnitt der J/ψ-Produktion bei einer Strahlenergie von 800 GeV gemessen wurde. Für die Untersuchungen in dieser Arbeit erfolgte deshalb eine Anpassung der Ereignisse mittels einer Ereignisgewichtungsfunktion $W = W(p_T, x_F)$. Nähere Einzelheiten zu der Gewichtung finden sich in [Iva 99]. Abbildung 5.1 zeigt die Anpassung des Monte Carlo J/ψ-p_T-Spektrums an die Messungen des Experimentes E789 mittels dieser Gewichtungsfunktion.
Da die generelle Funktionsweise des Pretriggers ohne Fehlfunktionen untersucht werden soll, wurde für die Kalibration des Kalorimeters eine Monte Carlo Kalibration verwendet, die zwar eine Verschmierung in der Energiekalibration beinhaltet, jedoch keinerlei tote oder fehlerhafte Kanäle aufweist. Ebenso wurde für die Untersuchungen von einem komplett mit Auslese- und Pretriggerelektronik ausgestatteten Kalorimeter ausgegangen. Tabelle 5.1 stellt die wichtigsten Parameter des verwendeten Monte Carlo Datensatz zusammen. Im Folgenden beziehen sich alle Bilder – sofern nicht anders vermerkt – auf Elektron-Kandidaten des Zerfalls $J/\psi \to e^+e^-$.

[2] *Fermi National Accelerator Laboratory*

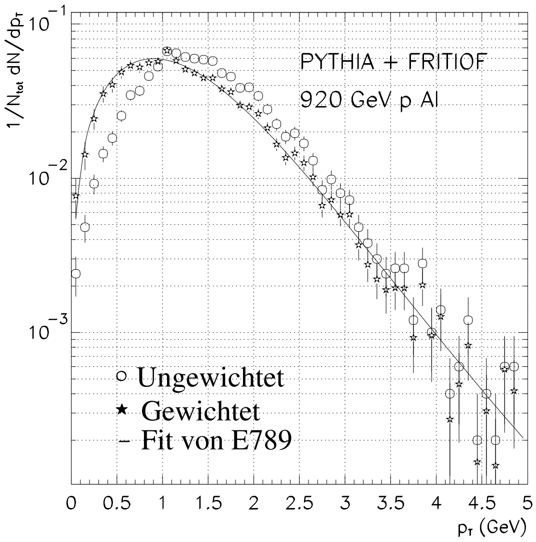


Abbildung 5.1: *Transversalimpulsspektrum der J/ψ-Resonanz des bei HERA-B verwendeten Monte Carlo Generators PYTHIA für 920 GeV Protonen, die auf Aluminiumkerne treffen. Überlagert dargestellt ist die Anpassung der Daten des Experimentes E789 (durchgezogene Linie) [Sch 95]. Die Sterne repräsentieren die Vorhersage der HERA-B Implementation der Charmonium-Produktion in PYTHIA unter Verwendung der gewichteten Ereignisse [Iva 99].*

MC Datensatz	
Zerfallskanal	Direkt produzierte $J/\psi \rightarrow e^+e^-$
Anzahl der Ereignisse	77.000
Detektor	
Geometrieversion	99-08-11
Kalorimeter	
Abdeckung	komplettes Kalorimeter
Kalibration	Monte Carlo (inkl. Energieverschmierung)

Tabelle 5.1: *Übersicht über die für die Monte Carlo Untersuchungen verwendeten Parameter des Monte Carlo Datensatzes.*

5.1.2 Das Kalorimeterrekonstruktionspaket CARE

Der ECAL Pretrigger besitzt die Aufgabe, Elektroncluster im Kalorimeter zu rekonstruieren. Aus dieser Sichtweise bietet es sich an, neben dem Vergleich mit Monte Carlo Daten, die Pretriggerinformationen auch mit einem für die Pretrigger Verhältnisse optimalen Kalorimeterrekonstruktionspaket zu vergleichen, um so Fehler und Verbesserungsmöglichkeiten im Rahmen des Rekonstruktionsalgorithmus des Pretriggers zu untersuchen.

Das Kalorimeterrekonstruktionspaket CARE [Vil 97] stellt für den Pretrigger diesen oberen Grenzwert eines optimalen Rekonstruktionsalgorithmus dar. Optimierungen wie die S-Shape-Korrektur (vgl. Abschnitt 4.3.6), die in CARE getestet und entwickelt wurden, wurden auch für den Pretrigger übernommen.

CARE arbeitet zur Rekonstruktion der Cluster im Kalorimeter in drei Stufen: Zunächst führt es eine Mustererkennung und eine Zuordnung der einzelnen Kalorimeterzellen zu den verschiedenen Clustern durch. Die Mustererkennung erfolgt durch eine rekursive Clustersuche, bei der benachbarte Zellen mit einer Energiedeposition einem gemeinsamen Cluster zugeordnet werden und so ein hierarchischer Clusterbaum aufgebaut wird [Dev 82]. In einem zweiten Schritt erfolgt gegebenenfalls die Aufspaltung komplexer Cluster in mehrere einzelne Cluster.

In der zweiten und dritten Stufe erfolgt die Kombination von Spur- und Kalorimeterinformationen und die Teilchenidentifikation. Eine detaillierte Beschreibung des Rekonstruktionsalgorithmus findet sich in [Vil 97] und [Vil 97a].
Die Rekonstruktion der x- und y-Position des Clusters erfolgt durch Bestimmung des Energieschwerpunktes der Energiedepositionen aller am Cluster beteiligten Zellen. Die Rekonstruktion der z-Position des Clusters erfolgt anhand der deponierten Clusterenergie E mittels der Relation

$$z = A + B \cdot ln(E) + z_o \tag{5.1}$$

wobei A und B zwei vom Kalorimeterbereich abhängige Konstanten und z_o die z-Position der Kalorimetereintrittsebene darstellen [Vil 97]. Abbildung 5.2 zeigt die Verteilung der z-Positionen der von CARE rekonstruierten Cluster.

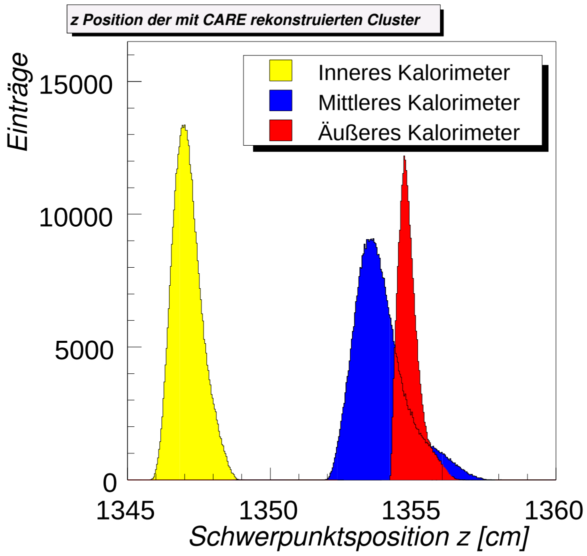


Abbildung 5.2: *Verteilung der mit CARE rekonstruierten z-Positionen für die verschiedenen Kalorimeterbereiche. Die Mittelwerte der Verteilungen liegen bei z=1347,12 cm für das innere, z=1353,86 cm für das mittlere, z=1354,86 cm für das äußere Kalorimeter und z=1351,52 cm bei Mittelung über das gesamte Kalorimeter.*

5.2 Beschränkungen des Pretriggers

Die Beschränkungen des Pretriggers gegenüber einer idealen Clusterrekonstruktion im Kalorimeter lassen sich in zwei Bereiche einteilen, die zwar mit einander verwoben sind, jedoch zwei verschiedene Aspekte betreffen: Der erste Bereich umfasst die Beschränkungen des Algorithmus zur Suche und Rekonstruktion der Cluster an sich, unabhängig von der technischen Umsetzung des Algorithmus, d. h. Beschränkungen bezüglich der Clustergröße oder der Art der Clusterrekonstruktion. Der zweite Bereich fasst die Beschränkungen zusammen, die bei der technischen Umsetzung des Algorithmus im Pretrigger auftreten, wie die Verwendung von gebinnten Werten zur Durchführung der Berechnungen. Im Folgenden sollen die einzelnen Beschränkungen kurz vorgestellt werden:

5.2.1 Beschränkungen im Pretrigger Algorithmus

Zu den Einschränkungen des Algorithmus des Pretriggers gehören:

- *Feste Clustergröße bei der Rekonstruktion*
  Im Gegensatz zu CARE erlaubt der Pretrigger Algorithmus keine flexible Clustergröße und keine Aufspaltung der Energie einer Zelle auf verschiedene Cluster,

sondern ist auf eine feste Clustergröße von 3×3 Zellen festgelegt[3]. Er weist somit insbesondere bei nahe beieinander liegenden Clustern eine Beeinträchtigung auf, da er hier zum einen zu einer Überschätzung der Energie tendiert, zum anderen eigentlich separierte Cluster als einen gemeinsamen Cluster interpretiert (vgl. Abschn. 4.1.2 und Abb. 5.3).

- *Schwerpunktsberechnung mittels Zellen des zentralen Kreuzes*
  Der ECAL Pretrigger verwendet nur das zentrale Kreuz für seine Schwerpunktsberechnungen, wohingegen CARE alle am Cluster beteiligten Zellen berücksichtigt (vgl. Abschnitt 4.3.4 und Abb. 4.17).

- *Inneres, mittleres und äußeres Kalorimeter als separate Detektoren*
  CARE ermöglicht eine über die drei Kalorimeterbereiche übergreifende Rekonstruktion der Cluster. Für den Pretrigger stellen die drei Kalorimeterbereiche dagegen drei unabhängige Detektoren ohne Verbindung dar. Cluster die an der Grenzfläche zwischen zwei Kalorimeterbereichen liegen, können so eine Transversalenergie unterhalb der Triggerschwelle besitzen, was zu Effizienzverlusten führen kann (vgl. Abb. 5.3).

- *Feste z-Position*
  Der ECAL Pretrigger führt im Rahmen seiner Clusterrekonstruktion nur eine Rekonstruktion der x- und y-Schwerpunktspositionen durch, nicht jedoch eine Rekonstruktion der z-Position des Clusters. Für die Extrapolationen und Berechnungen des Pretriggers und des First Level Triggers wird statt dessen eine feste z-Referenzposition verwendet.

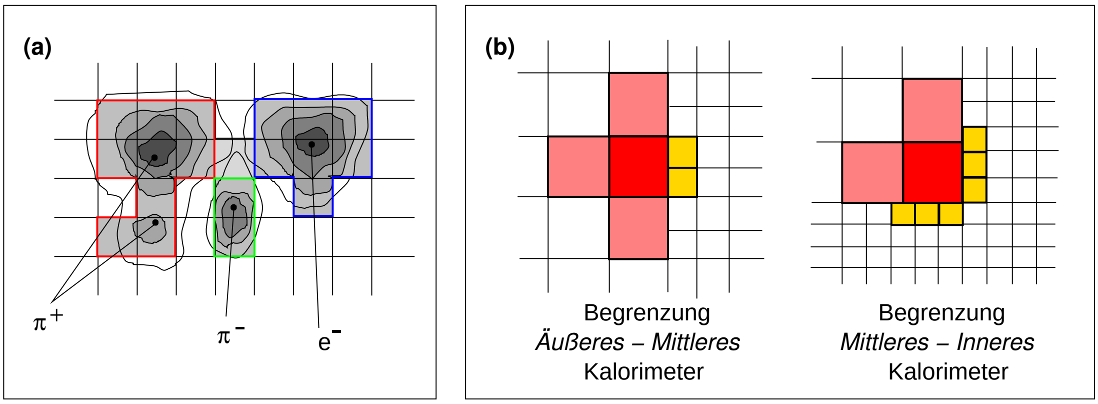


Abbildung 5.3: *Beschränkungen des Pretrigger Algorithmus gegenüber dem Rekonstruktionspaket CARE: (a) Clustergröße und Aufspaltung benachbarter Cluster [Vil 97]: Dargestellt ist ein Beispiel für die Möglichkeit der Aufspaltung nahe beieinander liegender Energiedepositionen im Kalorimeter in einen π^+ und π^- sowie einen Elektronencluster durch CARE. Die Cluster können dabei jeweils verschiedene Clusterformen besitzen. (b) Clusterrekonstruktion über die Grenzen der Kalorimeterbereiche hinweg [Vil 97a]: CARE erlaubt die Rekonstruktion über die Grenzen der verschiedenen Kalorimeterbereiche hinweg.*

[3]Durch Umsetzen der Lookuptables kann auch eine Konfiguration gewählt werden, bei der generell nur die fünf Zellen des zentralen Kreuzes verwendet werden (vgl. Abschn. 4.3.4).

5.2.2 Beschränkungen durch die technische Umsetzung des Algorithmus

Die Berechnung, Speicherung und Weitergabe der Clusterinformationen wird im ECAL Pretrigger durch Lookuptables und gebinnte Werte durchgeführt (vgl. Abschnitt 4.3.4). Die dadurch hervorgerufenen Beschränkungen sind im einzelnen:

- *Berechnung mittels gebinnter Werte in Lookuptables*
  Um eine Rekonstruktion in dem gegebenen, sehr kurzen Zeitrahmen durchführen zu können, wurde der Rekonstruktionsalgorithmus des Pretriggers in einem elektronischen Board realisiert, bei dem sämtliche Berechnungen mit Hilfe von kodierten Werten und vorberechneten Tabellen, so genannten Lookuptables, durchgeführt werden. Auch die Übertragung der gefundenen Pretriggercluster an die erste Triggerstufe erfolgt über kodierte Werte. Die kodierten Werte können gegenüber Berechnungen mit Fließkommazahlen zu einer Verschlechterung der Orts- und Energieauflösung führen.

- *Speicherung und Weitergabe der Clusterinformationen mittels gebinnter Werte*
  Die vom Pretrigger System ermittelten Clusterinformationen wie Clusterenergie, Clusterposition, Suchregion u. a. werden als gebinnte Werte an den First Level Trigger im Rahmen einer 80 Bit Pretrigger Nachricht weitergereicht.

5.3 Rekonstruktion der Clusterschwerpunkte

Zur Bestimmung der Clusterpositionen führt der ECAL Pretrigger eine Schwerpunktsberechnung der Energieverteilung eines 3×3-Zellenclusters durch, wobei der Cluster zentriert um die Zelle mit dem höchsten Energiegehalt innerhalb dieses Bereichs liegt.
Die Ortsauflösung des Pretrigger Systems ergibt sich aus dem Zusammenspiel des Pretrigger Algorithmus mit den in Abschnitt 5.2 diskutierten Limitierungen und der Detektorauflösung des Kalorimeters (vgl. Abschnitt 2.5.2).
Die Ortsauflösung des Pretriggers bestimmt zusammen mit der kinematischen Extrapolation die Größe des Suchfensters in der Superlage TC02 für den First Level Trigger und wirkt sich damit direkt auf die Effizienz des Pretriggers, die Rate des First Level Triggers und die Unterdrückung von nahe beieinander liegenden Clustern und Spuren aus (vgl. Abschn. 4.1.2).
Zur Bestimmung der Ortsauflösungen erfolgt ein Vergleich der rekonstruierten Clusterpositionen mit Monte Carlo Referenzwerten. In diesem Abschnitt werden deshalb zunächst die verwendeten Monte Carlo Referenzwerte vorgestellt bzw. definiert, bevor die verschiedenen Einflüsse auf die Ortsauflösung diskutiert werden und die Ortsauflösung des Pretriggers bestimmt wird.

5.3.1 Definition der MC Referenzpositionen

Der First Level Trigger sucht bei seiner Spursuche nach Treffern der Elektronspur in den einzelnen Spurkammerlagen. Insofern ist für den Extrapolations- und Spurfindungsalgorithmus jeweils die Position des Elektrons im Kalorimeter, unabhängig von der Bremsstrahlung entscheidend. Für die Energiebestimmung wiederum ist dagegen der Gesamtcluster inklusive der Bremsstrahlung relevant. Für den Pretrigger ist eine Unterscheidung

des Bremsstrahlungsclusters vom Elektroncluster nicht möglich. Für die Bestimmung der Monte Carlo Referenzposition kann diese Unterscheidung jedoch erfolgen und so wurde für die Definition der Monte Carlo Clusterposition nur die Elektronspur herangezogen. Da eine MC Position im Kalorimeter nicht definiert ist[4], kann die MC Position nur durch eine Clusterrekonstruktion oder durch eine Extrapolation von einem bekannten Punkt vor dem Kalorimeter aus bestimmt werden.
Um für die MC-Referenzwerte unabhängig von einem Rekonstruktionsalgorithmus zu sein, wurde die Elektronspur ausgehend von der letzten bekannten Position vor dem Kalorimeter in eine Extrapolationsebene in das Kalorimeter hinein extrapoliert. Wie in Abschnitt 5.2.1 erwähnt, führt der Pretrigger keine Rekonstruktion der z-Position des Clusters durch, sondern weist dem rekonstruierten Cluster eine feste z-Position ($z = 1350$ cm) in der Mitte des Kalorimeters zu. Die anschließende Extrapolation zur Superlage TC02 erfolgt dann ebenfalls von dieser z-Position aus. Als Monte Carlo Extrapolationsebene wurde deshalb für den Vergleich der Monte Carlo Werte mit den vom Pretrigger rekonstruierten Clusterpositionen die FLT-Referenzebene (z=1350 cm) gewählt, für den Vergleich mit dem Rekonstruktionspaket CARE wurden die MC-Werte dagegen in die entsprechende z-Ebene der durch CARE bestimmten z-Position extrapoliert.

5.3.2 Einfluß der z-Positions-Rekonstruktion auf die Auflösung

Durch die feste z-Position des ECAL Pretrigger Systems (vgl. Abschnitt 5.2) kommt es zu einer Verschiebung der Messebene und damit zu einer vom Winkel der Teilchenspur zur z-Achse abhängigen Unschärfe in der Ortsbestimmung. Die Winkel der Teilchenspuren liegen im Mittel bei $\frac{\Delta x}{\Delta z} = 0,03$, die Verschiebung der Messebene im Mittel bei etwa 3,5 cm, sodass diese Unschärfe in der Größenordnung von etwa 0,1 cm liegt. Darüber hinaus muss beachtet werden, dass sich die Verschiebung der z-Ebene bei der Extrapolation in die Superlage TC02 nur dann negativ auf die Abschätzung der Suchregionsgrenzen und somit auf die Extrapolations- bzw. Spurfindungseffizienz auswirkt, wenn die vom Pretrigger System verwendete z-Position (z=1350 cm) vor der korrekten z-Position liegt (vgl. Abbildung 5.4 und 4.21). In diesem Fall wird die Suchregion zu klein abgeschätzt und die Spur kann außerhalb des Suchbereichs liegen. Liegt die vom Pretrigger verwendete z-Position hinter der korrekten z-Position, so wird die Suchregion größer abgeschätzt und die Spuren liegen im Suchbereich. Da jedoch bei der Definition der Suchregion die Ortsauflösung berücksichtigt wird, dürfte dies im Allgemeinen unkritisch sein.

5.3.3 Kodierung der Schwerpunkte in der Pretrigger Nachricht

Wie in Abschnitt 5.2.2 erwähnt, erfolgt die Speicherung und Weitergabe der Clusterschwerpunkte mittels kodierter Werte: Die x-Position wird als 10-Bit-Wert ξ, die y-Position als 9-Bit-Wert η kodiert.
Bei der Wahl der Kodierung muss zunächst die Granularität und somit die Messgenauigkeit des Detektors, in diesem Falle also die der einzelnen Kalorimeterbereiche berücksichtigt werden. Darüber hinaus gibt es aber weitere Limitierungen in der Wahl der Kodierung, die ebenfalls eine Rolle spielen. Im Allgemeinen besitzt jede Superlage ihre eigene Kodierung, sodass die Kodierung jeder Superlage individuell bezüglich der Granularität

[4]Das Elektron erzeugt in der Wechselwirkung mit dem Kalorimeter einen elektromagnetischen Schauer, dessen Schwerpunkt die Position des Elektrons definiert.

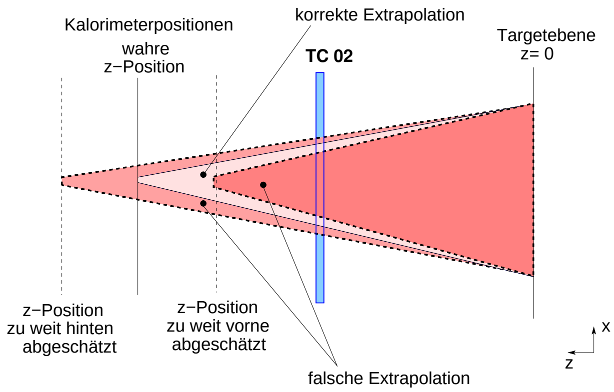


Abbildung 5.4: *Auswirkungen der Abschätzung einer falschen z-Position auf die Suchregion: Man erkennt dass eine Abschätzung der z-Position zu weit hinten zu einer Vergrößerung der Suchregion führt und somit nicht zu Effizienzverlusten. Eine Abschätzung der z-Position zu weit vorne führt jedoch zu einer Verkleinerung der Suchregion und damit zu möglichen Effizienzverlusten (vgl. auch Abb. 4.21).*

und des zu kodierenden Raumbereichs angepasst werden kann. Somit ist auch die Zuordnung der Kodierung unter Angabe der Superlage eindeutig. Für die Track Finding Units der Superlage TC02 ist dies insofern nicht zutreffend, da sie sowohl Myon-Spurkandidaten aus der Superlage MU1 (vgl. Abbildung 3.6) als auch Elektron-Spurkandidaten aus dem elektromagnetischen Kalorimeter erhalten und bei ihren Berechnungen nicht unterscheiden können, ob es sich um Elektron- oder Myonkandidaten handelt. Sie wissen somit nicht, welche Kodierung sie bei der Dekodierung der Werte berücksichtigen müssen.

Für das elektromagnetische Kalorimeter und die Superlage MU1 muss deshalb eine gemeinsame Kodierung gewählt werden, welche die beiden unterschiedlichen Granularitäten der Superlagen berücksichtigt. Für die Kodierung der x-Werte in ξ wurde deshalb die Granularität des Kalorimeters zugrunde gelegt, für die Kodierung der y-Werte in η die Granularität der Superlage MU1.

Kodierung der x-Position in den 10-Bit-Wert ξ

Zur Berechnung der Suchfenster in den TFUs ist neben der Position auch die Kenntnis des Kalorimeterbereichs, in dem der Cluster gefunden wurde, und damit die Granularität des Kalorimeterbereichs wichtig. In der TFU stehen nur die vier höherwertigen Bits 5, 6, 7 und 8 des 10-Bit-Wertes ξ zur Bestimmung der Granularität zur Verfügung. Dies legt die Granularitätsübergänge auf Vielfache von 32 fest. Da jedoch die Kodierung nur von der x-Position und nicht von den verschiedenen Kalorimeterbereichen abhängt, findet z. B. auch im mittleren Kalorimeter im Bereich kleiner x-Werte die höhere Granularität des inneren Kalorimeters Anwendung.

Abbildung 5.5 zeigt die Kodierungsfunktion der x-Werte in ξ. Tabelle 5.2 gibt einen Überblick über die verschiedenen Kodierungsbereiche und deren Auflösung[5].

Die im innersten Bereich des inneren Kalorimeters gewählte Granularität der Kodierung führt zu einer Verschlechterung der Auflösung in diesem Bereich im Vergleich zum restlichen inneren Kalorimeter. Bei der ursprünglichen Wahl der Granularität der Kodierung wurde von einer Auflösung einer viertel Kalorimeterzelle im gesamten Kalorimeter ausgegangen. Die zusätzlich zur Verfügung stehenden Bits wurden dann zur Erhöhung der Granularität auf ein Achtel der Zellgröße im gesamten Bereich des Kalorimeters außer

[5] Da es sich bei Binning-Funktionen um Rechteckverteilungen handelt, berechnet sich die Auflösung σ aus der Breite b der Rechteckverteilung anhand von $\sigma = b/\sqrt{12}$.

dem innersten Bereich des inneren Kalorimeters verwendet, da dort von einer schlechteren Auflösung aufgrund der Überlagerung verschiedener Cluster ausgegangen wurde [Rat 01].

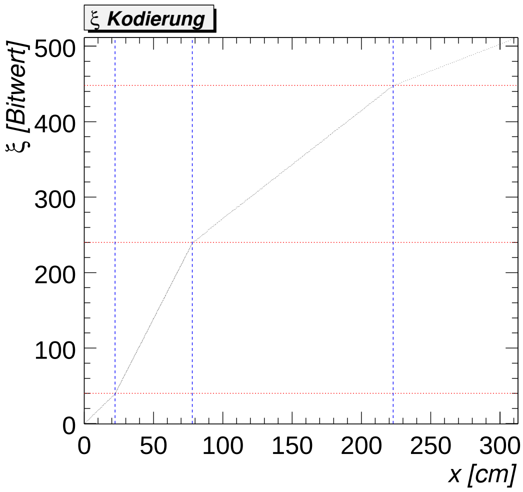


Abbildung 5.5: *Kodierung der x-Position in ξ. Dargestellt ist die Kodierungsfunktion zur Kodierung der x-Schwerpunktsposition im Kalorimeter in den 10-Bit-Wert ξ. Man erkennt vier verschiedene Granularitäten der Kodierung, die jeweils auf die einzelnen Kalorimeterabschnitte zugeschnitten sind. Die Kodierung der negativen x-Werte erfolgt analog durch Setzen des höchstwertigsten Bits.*

x-Bereich [cm]	*Zahl der Bins*	*Granularität* [Kalorimeterzelle]	*Kalorimeterbereich*	*Auflösung*
$\mid x \mid <$ 22,3	40	1/4	innerste 4 Spalten des inneren Kalorimeters	0,16 cm
22,3 $< \mid x \mid <$ 55,75	200	1/8	inneres Kalorimeter	0,08 cm
55,75 $< \mid x \mid <$ 223	208	1/8	mittleres Kalorimeter	0,20 cm
223 $< \mid x \mid <$ 312,2	64	1/8	äußeres Kalorimeter	0,40 cm

Tabelle 5.2: *Kodierung der x-Position in den 10-Bit-Wert ξ. Das höchstwertigste Bit dient als Vorzeichenbit. Für die Aufteilung in die verschiedenen Bereiche wurde die Granularität des Kalorimeters zugrunde gelegt.*

Kodierung der y-Schwerpunktsposition in den 9-Bit-Wert η

Da in y-Richtung keine Ablenkung im Magnetfeld stattfindet und die Auflösung der Spurkammern in y-Richtung deutlich unter der Auflösung der x-Richtung für den First Level Trigger liegt, sind die Anforderungen an die Auflösung in y-Richtung geringer. Die Kodierung der y-Schwerpunktsposition erfolgt im 9-Bit-Wert η. Analog wie bei der ξ-Kodierung erfolgt auch hier die Verwendung des höchstwertigsten Bits als Vorzeichenbit. Die verbleibenden acht Bits ermöglichen eine Kodierung der y-Werte in 256 Bins. Ebenfalls wie bei der Kodierung der x-Werte in ξ erfolgt die Erkennung der Granularität des Kalorimeterbereichs, aus dem der Cluster stammt, nur mit Hilfe der Bits 3, 4, 5, 6 und 7 des 9-Bit-Wertes η. Die Übergänge zwischen den verschiedenen Granularitäten sind somit auf Vielfache von 8 festgelegt. Abbildung 5.6 zeigt die Kodierungsfunktion der y-Werte in η, Tabelle 5.3 gibt einen Überblick über die verschiedenen Kodierungsbereiche und deren Auflösung.
Im Folgenden wird zunächst der Einfluss der Kodierungen und der Lookuptables auf die Auflösung untersucht, bevor die Ortsauflösung bestimmt wird.

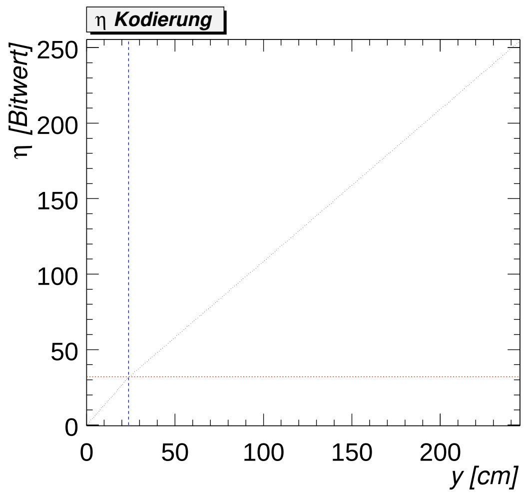


Abbildung 5.6: *Kodierung der y-Position in η. Dargestellt ist die Kodierungsfunktion zur Kodierung der y-Schwerpunktsposition im Kalorimeter in den 9-Bit-Wert η. Man erkennt zwei verschiedene Granularitäten der Kodierung. Die Granularität ist auf die Superlage MU1 hin optimiert.*

y-Bereich [cm]	*Zahl der Bins*	*Auflösung*
$\mid y \mid < 23{,}78$	32	0,21 cm
$23{,}78 > \mid y \mid < 297{,}6$	224	0,29 cm

Tabelle 5.3: *Kodierung der y-Position in den 9-Bit-Wert η. Das höchstwertigste Bit dient als Vorzeichenbit. Für die Aufteilung in die verschiedenen Bereiche wurde die Granularität der Superlage MU1 zugrunde gelegt.*

5.3.4 Berechnung des Clusterschwerpunktes mit Lookuptables

Die Simulation *EcalSIM* erlaubt sowohl die Berechnung des Clusterschwerpunktes mit Hilfe von Lookuptables (*realer Pretrigger Algorithmus*) als auch mit Hilfe einer idealisierten Berechnung (*idealisierter Pretrigger Algorithmus*), die zwar die gleichen Algorithmen wie die Lookuptables verwendet, jedoch keine Kodierung der Werte sondern Fließkommaberechnungen verwendet (vgl. Abschn. 4.4.6). Durch einen Vergleich der beiden Berechnungen lässt sich so der kombinierte Einfluss der Verwendung von Lookuptables und der Kodierung der Koordinaten in der Pretrigger Nachricht auf die Ortsauflösung studieren.
Abbildung 5.7 zeigt die Residuen des Vergleichs der mittels realem und der mittels idealisiertem Pretrigger Algorithmus rekonstruierten Clusterschwerpunktspositionen in x-Richtung. Rechts davon sind zusätzlich die auf die jeweilige Zelle zurückprojezierten Korrelationsdiagramme abgebildet. Abbildung 5.8 zeigt die entsprechenden Verteilungen für die Rekonstruktion der Clusterschwerpunkte in y-Richtung.
Zur Abschätzung der Breiten der Verteilungen wurden die RMS-Werte der Kurven herangezogen[6]. Tabelle 5.4 fasst die so ermittelten Breiten σ_x und σ_y der Residuen zusammen. Sowohl durch einen Vergleich der Breiten in Tabelle 5.4 und 5.2 bzw. 5.3, als auch durch die leicht rechteckförmige Form der Residuenverteilungen in Abbildung 5.7 und 5.8, erkennt man, dass sich die Breite der Residuen im Wesentlichen aus der Breite der Rechteckverteilungen der jeweiligen Kodierung ergibt. Besonders deutlich wird dies bei den Residuen in y-Richtung, da dort die Kodierung der Koordinate eine geringere

[6] Die RMS-Werte stellen für Rechteckverteilung eine leichte Unterschätzung der Auflösung dar

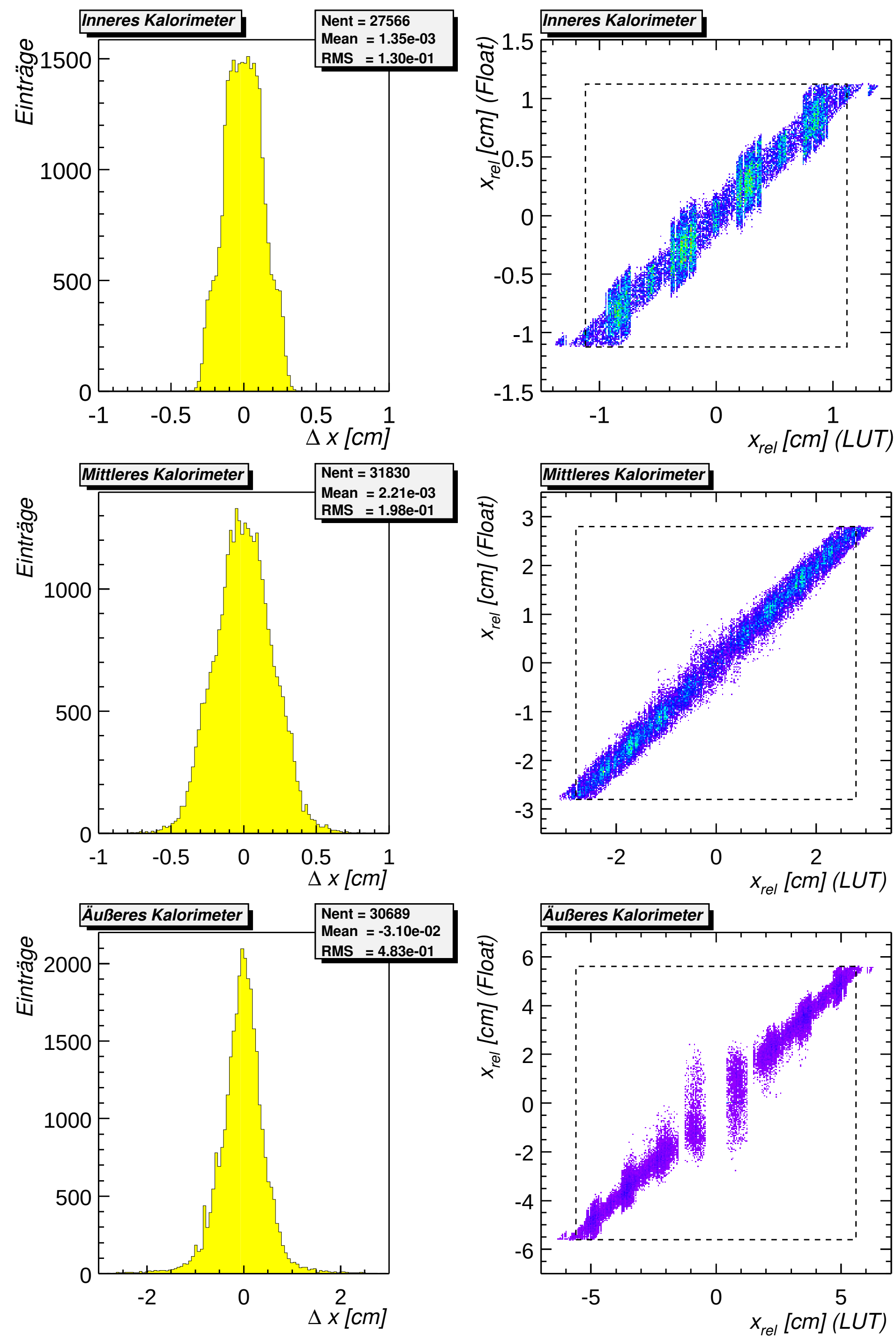


Abbildung 5.7: *Einfluss der Berechnung des x-Clusterschwerpunktes mit Lookuptables für das innere (oben), mittlere (Mitte) und äußere Kalorimeter (unten) auf die Ortsauflösung. Links sind die Differenzen der x-Positionen der Berechnungen mit und ohne Lookuptables gezeigt. Rechts sind die mittels Fließkommaberechnungen bestimmten x-Positionen gegen die mittels Lookuptables bestimmten x-Positionen aufgetragen (jeweils auf eine Kalorimeterzelle zurückprojiziert). Gestrichelt sind die Grenzen der Kalorimeterzellen dargestellt.*

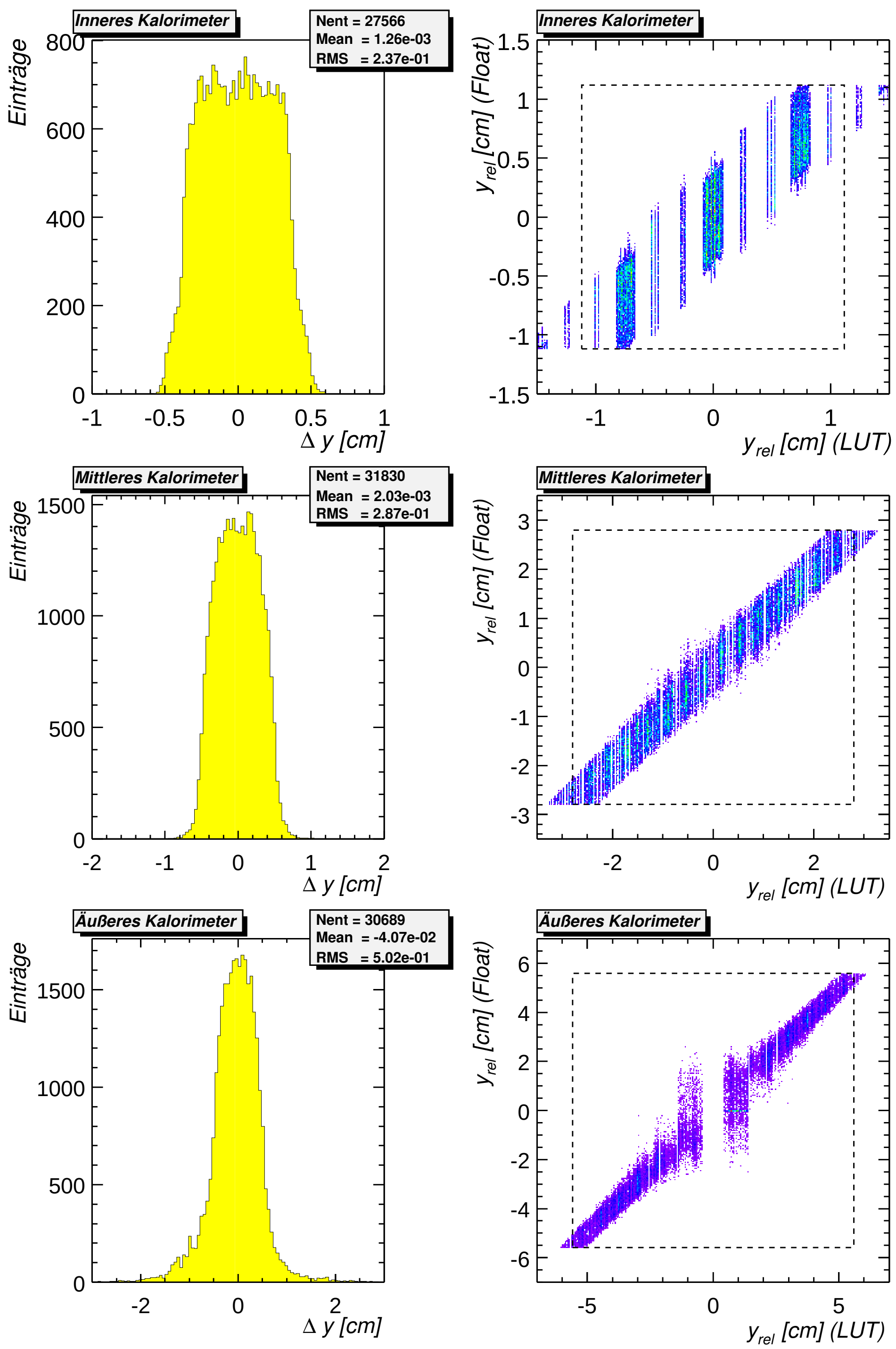


Abbildung 5.8: *Einfluss der Berechnung des y-Clusterschwerpunktes mit Lookuptables für das innere (oben), mittlere (Mitte) und äußere Kalorimeter (unten) auf die Ortsauflösung. Links sind die Differenzen der y-Positionen der Berechnungen mit und ohne Lookuptables gezeigt. Rechts sind die mittels Fließkommaberechnungen bestimmten y-Positionen gegen die mittels Lookuptables bestimmten y-Positionen aufgetragen (jeweils auf eine Kalorimeterzelle zurückprojiziert). Gestrichelt sind die Grenzen der Kalorimeterzellen dargestellt.*

Kalorimeter	σ_x (cm)	σ_y (cm)
Inneres	0,13	0,24
Mittleres	0,20	0,29
Äußeres	0,48	0,50

Tabelle 5.4: *Auflösung der Schwerpunktsberechnung durch Lookuptables. Die angegebenen Werte sind die RMS Werte der Residuen.*

Auflösung besitzt als die Kodierung des entsprechenden Bereiches in x-Richtung. Somit macht sich die Kodierung in y-Richtung auch wesentlich stärker bemerkbar.
In dem Korrelationsdiagramm des inneren Kalorimeters ist die Überlagerung der gröberen Kodierung des innersten Kalorimeters (erkennbar als breitere Streifen) und der wesentlich feineren Kodierung des restlichen Kalorimeters erkenntlich.
Da die Detektorgranularität des inneren Kalorimeters überall gleich ist und zusätzlich die Teilchendichte in Strahlrohrnähe höher ist, empfiehlt sich eine einheitliche Verwendung der höheren Granularität im gesamten Bereich des inneren Kalorimeters. Dies ist jedoch nur auf Kosten der Granularität in den anderen Bereichen möglich, da die Gesamtzahl der Bins nicht erhöht werden kann.
Im Bereich des äußeren Kalorimeters erkennt man, dass Clusterpositionen die in der Mitte einer Kalorimeterzelle liegen, an einer leicht nach außen zum Randbereich der Zelle hin verschobenen Position rekonstruiert werden. Der Grund liegt in dem Zusammenspiel der Verwendung von kodierten Werten zur Berechnung der Schwerpunkte und der anschließenden Kodierung der rekonstruierten Positionen in die 9 bzw. 10-Bit-Werte η und ξ. Im Bereich des inneren und mittleren Kalorimeters tritt dieser Effekt aufgrund der wesentlich feineren Kodierung nicht merkbar auf.
Im Folgenden wird die Ortsauflösung des Pretriggers bestimmt und der Einfluss der Beschränkungen quantifiziert.

5.3.5 Energieabhängige Ortsauflösung des Pretriggers

Für die Bestimmung der Ortsauflösung wurden die Residuen der MC Positionen mit den rekonstruierten Clusterpositionen der beiden Pretrigger Algorithmen (real und ideal) und des Rekonstruktionspaketes CARE ermittelt.
Da die einzelnen Auflösungen Teile oder alle der in Abschnitt 5.2 angeführten Beschränkungen enthalten, lässt sich durch einen Vergleich der Auflösungen der Einfluss der einzelnen Beschränkungen abschätzen.
Zur Bestimmung der energieabhängigen Ortsauflösung $\sigma(E)$ erfolgte eine von der Energie E abhängige Anpassung von Gaußfunktionen an die Breiten der Residuen. Abbildung 5.9 zeigt die so ermittelten Auflösungen für den Vergleich der x-Positionen zusammen mit den Designauflösungen als Funktion der Energie (vgl. Tabelle 2.2), Abbildung 5.10 die Auflösungen für den Vergleich der y-Werte. Die Kurven entsprechen der Anpassung der Funktion

$$\sigma(\mathrm{E}) = \frac{D_1}{\sqrt{E}} + D_2 \tag{5.2}$$

an die ermittelte, energieabhängige Ortsauflösung.

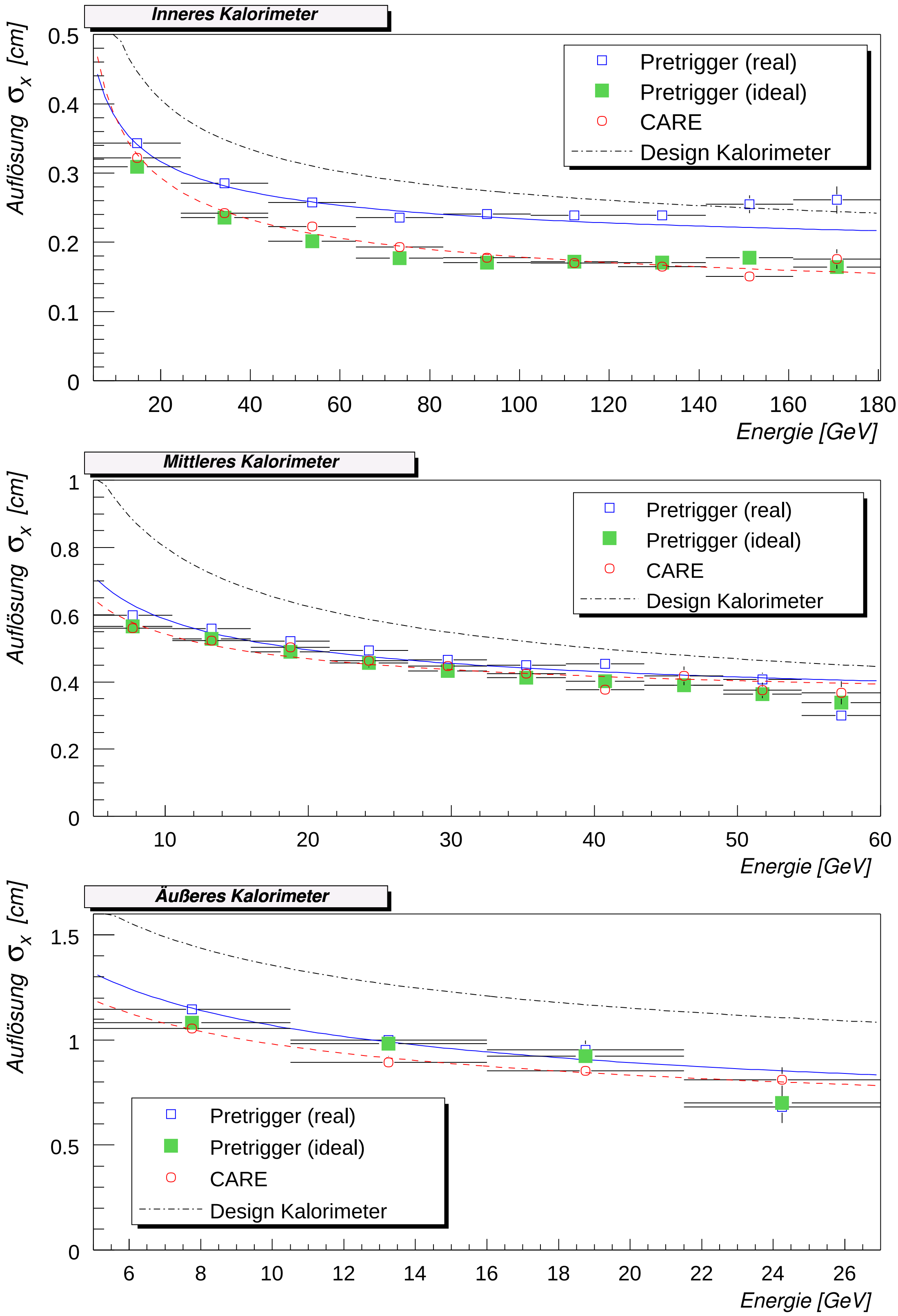


Abbildung 5.9: *Vergleich der x-Ortsauflösungen. Dargestellt sind die Ortsauflösungen des realen Pretrigger Algorithmus, des idealisierten Pretrigger Algorithmus, sowie des Rekonstruktionspaketes CARE zusammen mit den Designauflösungen als Funktion der Energie (vgl. Tabelle 2.2). Die Kurven entsprechen der Anpassung der Funktion 5.2 an die energieabhängigen Auflösungen.*

Ortsauflösung in x

Tabelle 5.5 gibt die durch Anpassung der Kurven (5.2) an die energieabhängigen Breiten der Residuen ermittelte Ortsauflösungen in x-Richtung des realen Pretrigger Algorithmus, Tabelle 5.6 die des Rekonstruktionspaketes CARE zusammen mit dem Energiebereich an, der für die Anpassung verwendet wurde.

Kalorimeter	D_1 [10^{-1} GeV$^{1/2}$ cm]	D_2 [10^{-1} cm]	*Energiebereich* [GeV]
Inneres	6,69 ± 0,25	1,67 ± 0,04	$5 \leq E \leq 180$
Mittleres	9,83 ± 0,45	2,76 ± 0,11	$5 \leq E \leq 60$
Äußeres	19,09 ± 2,78	4,66 ± 0,86	$5 \leq E \leq 27$

Tabelle 5.5: *Ortsauflösung des Pretriggers in x-Richtung für die verschiedenen Kalorimeterbereiche, ermittelt aus der Anpassung der Funktion (5.2) an die energieabhängigen Breiten der Residuen des Vergleiches des realen Pretrigger Algorithmus mit den MC Werten (vgl. Abbildung 5.9).*

Kalorimeter	D_1 [10^{-1} GeV$^{1/2}$ cm]	D_2 [10^{-1} cm]	*Energiebereich* [GeV]
Inneres	9,25 ± 0,28	0,84 ± 0,04	$5 \leq \mathrm{E} \leq 180$
Mittleres	7,93 ± 0,63	2,92 ± 0,16	$5 \leq \mathrm{E} \leq 60$
Äußeres	15,99 ± 2,49	4,75 ± 0,73	$5 \leq \mathrm{E} \leq 27$

Tabelle 5.6: *Ortsauflösung des Rekonstruktionspaketes CARE in x-Richtung für die verschiedenen Kalorimeterbereiche, ermittelt aus der Anpassung der Funktion (5.2) an die energieabhängigen Breiten der Residuen des Vergleiches des Kalorimeterrekonstruktionspaketes CARE mit den MC Werten (vgl. Abbildung 5.9).*

Da der idealisierte Pretrigger Algorithmus nur den reinen Algorithmus ohne den zusätzlichen Einfluss von Kodierungen und Binning enthält, kann durch einen Vergleich der Auflösung des idealisierten Pretrigger Algorithmus mit der Auflösung von CARE die relative Güte des generellen Pretrigger Algorithmus bestimmt werden und damit der Einfluss der in Abschnitt 5.2.1 angeführten Beschränkungen.

Man erkennt in Abbildung 5.9, dass die Auflösung des idealisierten Pretriggeralgorithmus in allen drei Kalorimeterbereichen praktisch gleich der von CARE ist. Die Beschränkungen des Algorithmus wirken sich damit nicht auf die Auflösung aus, und stellen somit keine wesentliche Einschränkung des Algorithmus dar.

Durch einen Vergleich der Ortsauflösung des realen Pretrigger Algorithmus mit der Auflösung des idealisierten Pretrigger Algorithmus bzw. der Auflösung des Rekonstruktionspaketes CARE lässt sich darüber hinaus der Einfluss der Verwendung von kodierten Werten und Lookuptables ermitteln.
Im mittleren und äußeren Kalorimeter ist die Ortsauflösung des realen Pretriggeralgorithmus gleich der Auflösung des idealisierten Pretriggers und der Auflösung des Rekonstruktionspaketes CARE. Die Verwendung von Lookuptables und gebinnten Werten stellt somit in diesem Bereich keine Einschränkung des Pretriggeralgorithmus dar.
Im Bereich des inneren Kalorimeters ist die Ortsauflösung des realen Pretriggeralgorithmus jedoch um $\approx 50\,\%$ schlechter als die des idealen Pretriggeralgorithmus bzw.

des Rekonstruktionspaketes CARE. Damit stellt in diesem Bereich die Verwendung von Lookuptables und kodierten Werten eine deutliche Beeinträchtigung des Pretriggeralgorithmus dar.

Man erkennt darüber hinaus im inneren Kalorimeter im Bereich großer Energien einen leichten Anstieg der Ortsauflösung des realen Pretrigger Algorithmus im Gegensatz zu einem kontinuierlichen Abfall der Ortsauflösungen von CARE und dem idealen Pretrigger Algorithmus. Im Bereich des mittleren und äußeren Kalorimeter tritt dieser Anstieg nicht auf. Der Grund für den Anstieg liegt ebenfalls in der schlechteren Auflösung der Kodierung der Positionen im innersten Bereich des inneren Kalorimeters. Dies wird ersichtlich, wenn man zum einen berücksichtigt, dass die Anzahl der Cluster mit wachsendem Abstand der Cluster vom Protonenstrahlrohr abnimmt, sodass der Großteil der Cluster des inneren Kalorimeters im innersten Bereich liegen und damit Cluster in diesem Bereich auch den größten Beitrag zur Ortsauflösung liefern. Zum anderen müssen Cluster im innersten Bereich des inneren Kalorimeters eine vergleichsweise hohe Energie besitzen, um eine Transversalenergie oberhalb der Triggerschwelle zu besitzen. Der größte Anteil an Clustern im inneren Kalorimeter mit hoher Energie kommt deshalb aus dem innersten Bereich des Kalorimeters.

Diese Annahme wird noch zusätzlich durch den Vergleich der Ortsauflösungen im mittleren und äußeren Kalorimeter unterstützt, bei denen die Unterschiede in den Ortsauflösungen minimal sind und somit die Verwendung von kodierten Werten keine Verschlechterung der Auflösung bewirkt. Die größeren Fehlerbalken im Bereich der höheren Energien, insbesondere im äußeren Kalorimeter lassen sich der verminderten Statistik zurechnen.

Insgesamt gesehen stellt der generelle Pretrigger Algorithmus keine wesentliche Verschlechterung der Ortsauflösung des Pretriggers im Vergleich zu CARE dar. Im inneren Kalorimeters sollte jedoch, wie bereits in Abschnitt 5.3.3 erwähnt, eine einheitliche Granularität für die Kodierung Verwendung finden.[7]

Vergleicht man die Auflösungen des idealisierten Pretriggers, des realen Pretriggers und des Rekonstruktionspaketes CARE mit der angestrebten Designauflösung des Kalorimeters (vgl. auch Tabelle 2.2), so erkennt man dass die Auflösungen in allen drei Kalorimeterbereichen besser als die Designauflösungen sind und somit die an das Kalorimeter gestellten Anforderungen erfüllen.

Ortsauflösung in y

Tabelle 5.7 gibt die durch die Anpassung der Kurven (5.2) an die energieabhängigen Breiten der Residuen ermittelte Ortsauflösungen $\sigma_y(E)$ in y-Richtung des realen Pretrigger Algorithmus, Tabelle 5.8 die des Rekonstruktionspaketes CARE zusammen mit dem Energiebereich an, der für die Anpassung verwendet wurde.

[7] Es muss erwähnt werden dass diese Optimierung schwierig ist. Eine gleichmäßigere Aufteilung der 512 zur Verfügung stehenden Bins wäre die einheitliche Verwendung einer Granularität von einer sechstel Kalorimeterzelle für das innere Kalorimeter und jeweils einer fünftel Zelle für das mittlere und äußere Kalorimeter. Diese Art der Kodierung würde 240 Bins für das innere, 160 Bins für das mittlere und 90 Bins für das äußere Kalorimeter, insgesamt also 490 Bins benötigen. Damit blieben aber zum einen 20 Bins ungenutzt, zum anderen liegen die Granularitätsübergänge nicht wie gefordert bei Vielfachen von 32 (vgl. Abschnitt 5.3.3).

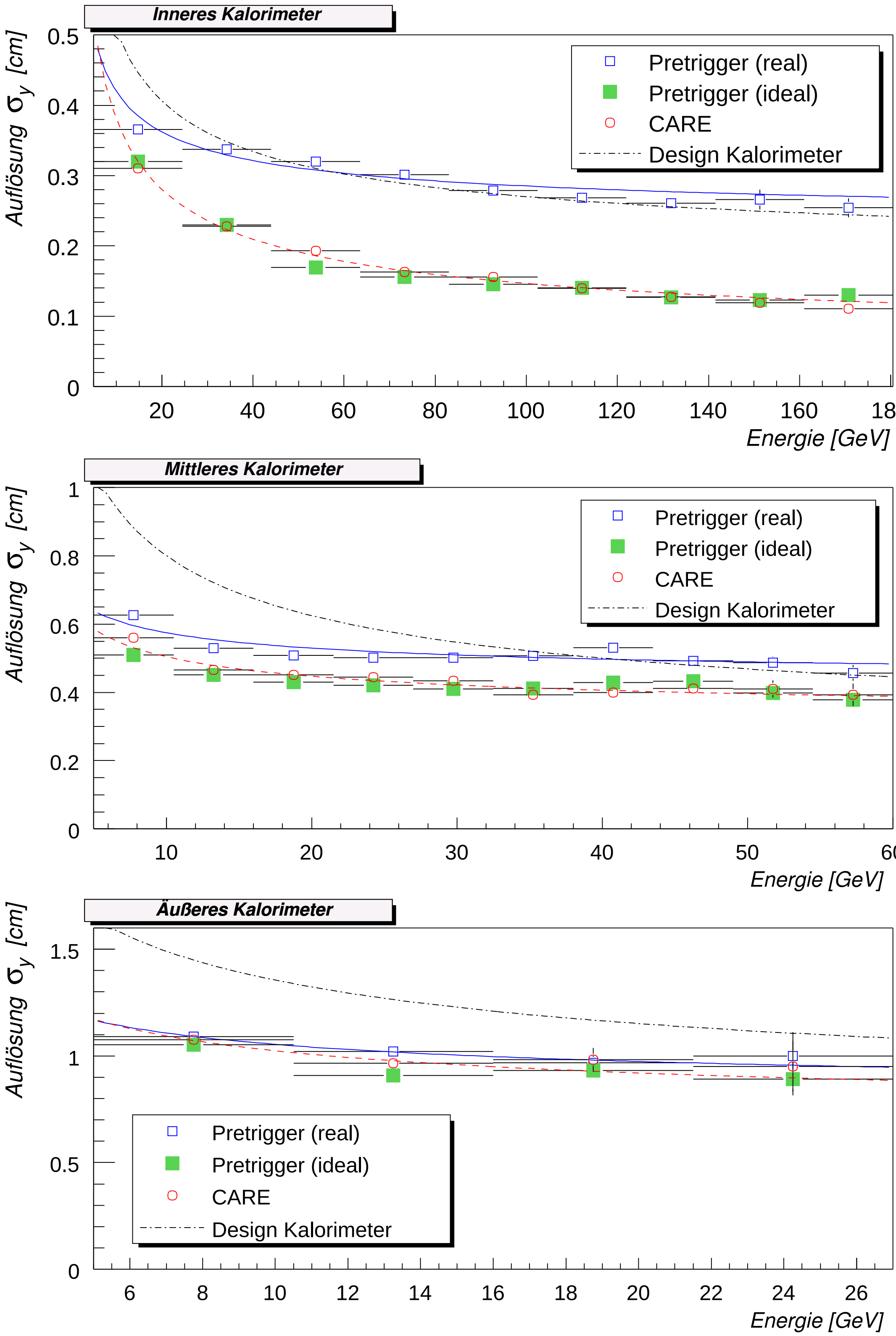


Abbildung 5.10: *Vergleich der y-Ortsauflösungen. Dargestellt sind die Ortsauflösungen des realen Pretrigger Algorithmus, des idealisierten Pretrigger Algorithmus, sowie des Rekonstruktionspaketes CARE zusammen mit den Designauflösungen als Funktion der Energie (vgl. Tabelle 2.2). Die Kurven entsprechen der Anpassung der Funktion 5.2 an die energieabhängigen Auflösungen.*

Kalorimeter	D_1 [10^{-1}GeV$^{1/2}\cdot$ cm]	D_2 [10^{-1} cm]	*Energiebereich* [GeV]
Inneres	6,22 ± 0,27	2,23 ± 0,04	$5 \leq E \leq 180$
Mittleres	4,88 ± 0,27	4,20 ± 0,04	$5 \leq E \leq 60$
Äußeres	8,65 ± 2,24	7,80 ± 0,69	$5 \leq E \leq 27$

Tabelle 5.7: *Ortsauflösung des Pretriggers in y-Richtung für die verschiedenen Kalorimeterbereiche, ermittelt aus der Anpassung der Funktion (5.2) an die energieabhängigen Breiten der Residuen des Vergleiches des realen Pretrigger Algorithmus mit den MC Werten (vgl. Abbildung 5.10).*

Kalorimeter	D_1 [10^{-1} GeV$^{1/2}\cdot$ cm]	D_2 [10^{-1} cm]	*Energiebereich* [GeV]
Inneres	10,82 ± 0,21	0,38 ± 0,03	$5 \leq E \leq 180$
Mittleres	6,21 ± 0,40	3,08 ± 0,09	$5 \leq E \leq 60$
Äußeres	11,25 ± 2,64	6,67 ± 0,84	$5 \leq E \leq 27$

Tabelle 5.8: *Ortsauflösung des Rekonstruktionsprogramms CARE in y-Richtung für die verschiedenen Kalorimeterbereiche, ermittelt aus der Anpassung der Funktion (5.2) an die energieabhängigen Breiten der Residuen des Vergleiches des Kalorimeterrekonstruktionsprogramms CARE mit den MC Werten (vgl. Abbildung 5.10).*

Analog wie bei der Diskussion der Ortsauflösung in x-Richtung erlaubt der Vergleich der Ortsauflösung des idealisierten Pretrigger Algorithmus mit dem Rekonstruktionspaket CARE eine Abschätzung der Güte des Pretrigger Algorithmus und des Einflusses der in Abschnitt 5.2.1 diskutierten Beschränkungen des Pretrigger Algorithmus. Man erkennt in Abbildung 5.10 in allen drei Kalorimeterbereichen, dass die Ortsauflösung des idealisierten Pretrigger Algorithmus nur geringfügig schlechter ist, als die Auflösung des Rekonstruktionspaketes CARE. Damit wirken sich die in Abschnitt 5.2.1 diskutierten Beschränkungen des Pretrigger Algorithmus auch in y-Richtung nicht auf die Ortsauflösung des Pretriggers aus.

Vergleicht man jedoch die Auflösung des realen Pretrigger Algorithmus mit der Auflösung des idealisierten Pretrigger Algorithmus bzw. der Auflösung von CARE, so erkennt man hier den starken Einfluss der Verwendung von kodierten Werten und Lookuptables. Im inneren Kalorimeter verschlechtert sich die Auflösung um 100 %, im mittleren Kalorimeter um 20 %. Lediglich im äußeren Kalorimeter besitzt die Kodierung und die Verwendung von Lookuptables keinen Einfluss auf die Auflösung.
Die in Abschnitt 5.2.2 diskutierten Beschränkungen wirken sich deshalb sehr stark auf die Auflösung des Pretriggers aus. Wie in Abschnitt 5.3.3 bereits erwähnt, steht für die Kodierung des y-Werte mit 256 Bins nur die Hälfte der Bins zur Verfügung, die für die Kodierung der x-Werte zur Verfügung steht (512 Bins). Da der geometrische Bereich, der kodiert werden muss, in x und y ungefähr gleich ist, ist die Granularität der Kodierung zwangsläufig doppelt so schlecht. Betrachtet man die Granularitäten in Tabelle 5.3, so fällt auf, dass insbesondere im Bereich des inneren Kalorimeters eine wesentlich schlechtere Granularität in y-Richtung verwendet wird als in x-Richtung.
Eine Optimierung ist aufgrund der stark beschränkten Zahl von 256 Bins zur Kodierung der y-Positionen in η nur schwer möglich. So beträgt allein die Zahl an Kalorimeterzellen in y-Richtung bereits 138. Teilt man 256 Bins auf diese 138 Zellen auf, so bleiben

nicht einmal 2 Bins pro Zelle. Auf der anderen Seite sind die Anforderungen an die y-Koordinate für die Spursuche im First Level Trigger wesentlich geringer als die Anforderungen an die x-Koordinate und damit sind auch die Suchregionen entsprechend größer (vgl. Abschnitt 4.3.7). Inwieweit die Größe der Suchregion ausreichend für die Auflösung ist, wird in Abschnitt 5.5 diskutiert werden.

Vergleicht man ebenso wie bei den x-Auflösungen die Auflösungen des idealisierten Pretriggers, des realen Pretriggers und des Rekonstruktionspaketes CARE mit der angestrebten Designauflösung des Kalorimeters (vgl. auch Tabelle 2.2), so erkennt man, dass die Auflösungen des realen Pretriggers vergleichbar mit den Designauflösungen sind. Lediglich im mittleren Kalorimeter ist die Auflösung des realen Pretriggers im Bereich hoher Energien geringfügig schlechter als die geforderten Designauflösung. Die Auflösungen des idealisierten Pretrigger Algorithmus und des Rekonstruktionspaketes CARE sind in allen drei Kalorimeterbereichen im gesamten Energiebereich besser als die geforderte Designauflösung. Damit erfüllen auch die Auflösungen in y-Richtung die Designanforderungen.

5.3.6 Fazit

Durch den Vergleich des idealisierten Pretrigger Algorithmus (d. h. des reinen Algorithmus ohne Binning der Variablen und Verwendung von Lookuptables) mit dem Kalorimeterrekonstruktionspaket CARE wurde gezeigt, dass die Auflösungen des reinen Pretrigger Algorithmus vergleichbar mit den Auflösungen von CARE sind. Der Einfluss der algorithmischen Beschränkungen (vgl. Abschn. 5.2.1) wie die Berechnungen mittels fester Clustergröße, festgelegter z-Position sowie der getrennten Bearbeitung der drei Kalorimeterbereiche, auf die Ortsauflösung ist damit vernachlässigbar.
Die Verwendung von Lookuptables und gebinnten Werten für die Berechnung, Speicherung und Weitergabe der Clusterpositionen stellt jedoch in einigen Bereichen des Kalorimeters eine Beschränkung der Ortsauflösung dar: In x-Richtung führt es im Bereich des inneren Kalorimeters zu einer knapp 50 % schlechteren Auflösung, im mittleren und äußeren Kalorimeter stellt es dagegen keine Beschränkung dar und wirkt sich nicht auf die Ortsauflösung aus. In y-Richtung sind die Auswirkungen aufgrund der schlechteren Granularität größer: Im inneren Kalorimeter verschlechtert sich die Auflösung durch Verwendung der gebinnten Werte bzw. Lookuptables um 100 % und im mittleren Kalorimeter um 20 %. Lediglich im äußeren Kalorimeter wirkt sich die Kodierung nicht auf die Ortsauflösung aus.
Der Grund liegt jeweils in der begrenzten Zahl an Bins zur Kodierung der Werte – da die Zahl an Bins in y-Richtung die Hälfte der Bins in x-Richtung beträgt, wirkt sich diese Limitierung entsprechend stärker in y-Richtung aus.
In x-Richtung wirkt sich besonders die schlechtere Granularität im innersten Bereich des inneren Kalorimeters aus (vgl. Tabelle 5.2), in y-Richtung ist es eher die generell limitierte Zahl an Bins. Eine Optimierung der Kodierung ist insofern schwierig, als eine Optimierung an einer Stelle aufgrund der festgelegten Gesamtzahl an Bins zwangsläufig mit einer Verschlechterung an einer anderen Stelle einhergeht. In x-Richtung ist jedoch eine konstante Granularität über den gesamten Bereich des inneren Kalorimeters wünschenswert. Es sei darauf hingewiesen, dass sich die schlechtere Granularität der Kodierung im innersten x-Bereich im gesamten Bereich des inneren Kalorimeters, der in diesem x-Bereich liegt, auswirkt, im mittleren und äußeren Kalorimeter dagegen aufgrund der

dort generell schlechteren Granularität und Kodierung nicht zu einer Verschlechterung der Auflösung führt.

Die Auflösungen des realen Pretrigger Algorithmus sind genauso wie die Auflösungen des Rekonstruktionspaketes CARE im gesamten Kalorimeter vergleichbar oder besser als die Designauflösungen.

5.4 Messung der Clusterenergie

Die Aufgabe des Pretriggers ist es, die Gesamtenergie des Elektrons zu messen, um zusammen mit der rekonstruierten Schwerpunktsposition einen Triggerschnitt auf die Transversalenergie der Cluster durchzuführen und eine kinematische Extrapolation des Elektronclusters zur Superlage TC02 durchzuführen. Die im Pretrigger gemessene Energie E wird darüber hinaus nach erfolgreicher Spursuche und Rekonstruktion des Impulses p des Teilchens im First Level Trigger für den Triggerschnitt auf das Verhältnis E/p in der Track Parameter Unit verwendet (vgl. Abschnitt 3.5.4).
Generell wirken sich Ungenauigkeiten in der Energiebestimmung somit durch den Schnitt auf die Transversalenergie des Clusters auf die Triggereffizienz und durch die Extrapolation auf die Extrapolationseffizienz aus. Größere Unsicherheiten in der Energiebestimmung führen zu größeren Unsicherheiten in der Bestimmung der Richtung der Spur. Um keine Effizienz zu verlieren, müssen die Suchfenster für den First Level Trigger entsprechend groß gewählt werden, was sich direkt auf die Rate des First Level Triggers auswirkt.
Wird die wahre Energie des Elektrons unterschätzt, so kann dies dazu führen, dass die dem Cluster zugeordnete Transversalenergie unterhalb der geforderten Mindesttransversalenergie liegt, oder dass das E/p -Verhältnis außerhalb des Akzeptanzbereichs liegt. Wird die Energie überschätzt, so kann dies zu einer zu einem falschen Suchfenster (vgl. Abschnitt 4.3.7) und damit zu Verlusten in der Extrapolationseffizienz führen. Zusätzlich kann wie bei einer Unterschätzung der Energie das E/p -Verhältnis außerhalb des Akzeptanzbereichs liegen. Auf die Pretriggereffizienz wird in Abschnitt 5.6 eingegangen, auf die Extrapolationseffizienz in Abschnitt 5.5.

Die Energieauflösung des ECAL Pretriggers ergibt sich durch die Energieauflösung des Kalorimeters und das Zusammenspiel des Pretrigger Algorithmus mit den in Abschnitt 5.2 diskutierten Beschränkungen des Pretriggers.
In diesem Abschnitt soll zunächst auf die Definition der MC Referenzwerte eingegangen werden, bevor die verschiedenen Einflüsse auf die Energieauflösung diskutiert werden und die Energieauflösung des Pretriggers bestimmt wird.

5.4.1 Definition der MC Referenz Energien

Da ein Elektron während des Durchgangs durch den Detektor Bremsstrahlung emittiert, setzt sich die gemessene Energie eines Elektrons am Kalorimeter aus der Energie des Elektrons unmittelbar vor dem Kalorimeter und der Energie der emittierten Bremsstrahlungsphotonen zusammen.
Wie in Abschnitt 4.3.8 dargestellt, unterscheidet man drei örtliche Bereiche der Erzeugung von Bremsstrahlungsphotonen (vgl. Abbildung 4.24): Photonen, die vor dem Magneten abgestrahlt werden, werden nicht im Magnetfeld abgelenkt und liegen deshalb größtenteils außerhalb des durch Elektron-Clusterbereichs, wohingegen Photonen, die

nach dem Magneten abgestrahlt werden, typischerweise zu der vom Pretrigger gemessenen Clusterenergie beitragen. Photonen, die im Magneten abgestrahlt werden, können je nach Ort ihrer Erzeugung und dem durchflogenen Krümmungsradius des Elektrons innerhalb oder außerhalb des Clusterbereichs liegen und somit teilweise zu der gemessenen Energie beitragen. Um einen Eindruck über die Größe des relativen Energieverlustes in den drei Bereichen zu bekommen, zeigt Abbildung 5.11 die Verteilungen der relativen Energieverluste der Elektronen.

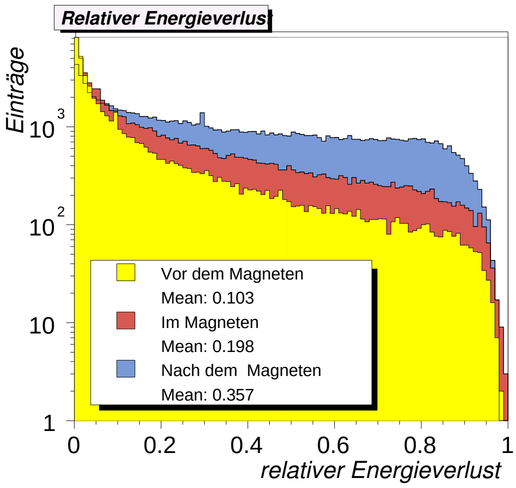


Abbildung 5.11: *Energieverlustverteilungen der J/ψ-Elektronen bzw. Positronen in den verschiedenen Detektorabschnitten. Dargestellt sind die Verteilungen der relativen Energieverluste vor dem Magneten, im Magneten sowie zwischen dem Magneten und dem Kalorimeter. Die Elektronen verlieren im Mittel 10 % ihrer Energie vor dem Magneten, 20 % im Magneten und 36 % nach dem Magneten in Form von Bremsstrahlung.*

Die im Pretrigger gemessene Clusterenergie stellt somit nur einen Teil der ursprünglichen Energie des Elektrons und somit eine untere Abschätzung der Elektronenenergie bei der Erzeugung dar. Untersuchungen haben gezeigt, dass die Energie des Elektrons im Mittelpunkt des Magneten (bei z=450 cm) als eine sinnvolle MC-Abschätzung der Pretriggerenergie gilt [Sam 01a]. Für die Untersuchungen zur Energieauflösung des Pretriggers wurde deshalb diese Energie als MC-Referenzwert verwendet.

5.4.2 Einfluss der Clustergröße auf den Anteil der rekonstruierten Energie

Der Pretrigger Algorithmus verwendet für seine Clusterrekonstruktion einen Bereich von 3×3 Zellen und betrachtet die einzelnen Kalorimeter als separate Detektoren. Zur Untersuchung des Einflusses der limitierten Clustergröße wurde die von dem Elektron und seiner nach dem Magneten abgestrahlten und im Kalorimeter deponierten Energie mit der innerhalb des Clusterbereichs liegenden Energie verglichen. Abbildung 5.12 zeigt die Verteilungen für alle Cluster und für Cluster, die an der Grenze zwischen zwei Kalorimeterbereichen liegen.

Man erkennt, dass im Mittel über 96 % der Clusterenergie durch den Pretrigger rekonstruierbar sind, für das äußere Kalorimeter sind es sogar 98 %. Dies liegt daran, dass im äußeren Kalorimeter doppelt so große Kalorimeterzellen bei gleichem Molièreradius verwendet werden (vgl. Tabelle 2.1). Damit ist die Berechnung der Cluster in einem $3{\times}3$-Nonett vollkommen ausreichend um den überwiegenden Teil der rekonstruierbaren Teilchenenergie zu messen.

Für Zellen an der Grenze zwischen zwei Kalorimeterbereichen reduziert sich dieser Prozentsatz aufgrund der limitierten Clustergröße. Besonders nachteilig macht sich dies im

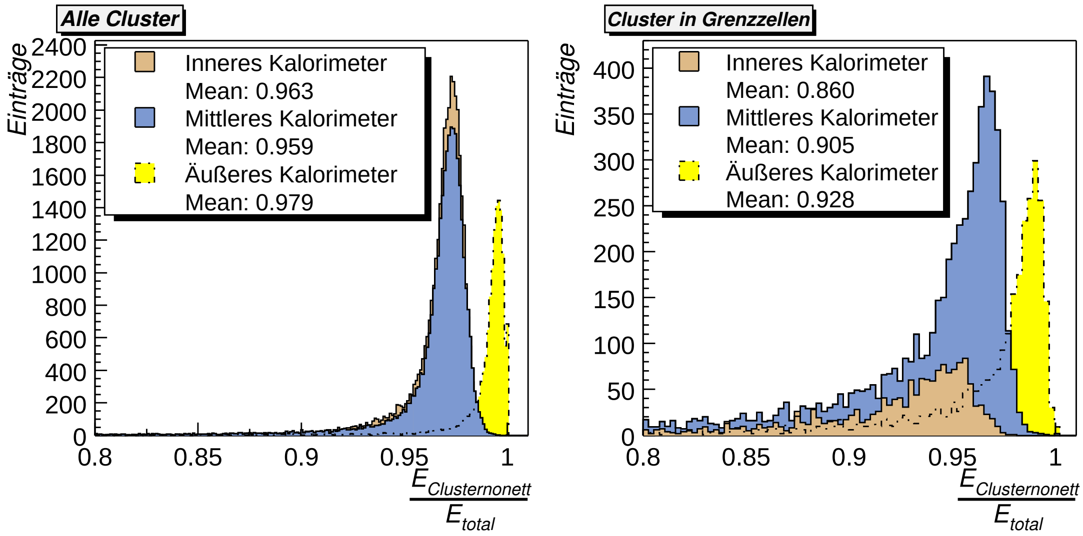


Abbildung 5.12: *Einfluss der Pretrigger Clustergröße auf die rekonstruierte Energie. Dargestellt sind die durch die Pretrigger Clustergröße rekonstruierbaren relativen Energieanteile der Gesamtenergie der Elektronen für alle Cluster (links) und für Cluster, die an der Grenze zwischen zwei Kalorimeterbereichen liegen (rechts).*

inneren Kalorimeter bemerkbar, in dem der mittlere Energiegehalt um etwa 10 % auf 86 % fällt – das mittlere und äußere Kalorimeter ermöglichen im Mittel immer noch die Rekonstruktion von über 90 % der Energie.
Zieht man weiterhin in Betracht, dass nur ca. 8 % der Cluster in Grenzzellen liegen, so liegen die Verluste durch die Aufteilung des Pretriggers in drei Teile im Bereich weniger Prozent.

5.4.3 Kodierung der Energie in der Pretrigger Nachricht

Der ECAL Pretrigger übergibt die gemessene Clusterenergie für die weitere Spursuche an den First Level Trigger als 7-Bit-Wert innerhalb der Pretrigger Nachricht (vgl. Abschn. 4.3.4). Für die Kodierung der Energie in der Pretrigger Nachricht wird die globale FLT Kodierung der Energie angewandt: der kinematisch rekonstruierbare Bereich des FLT liegt zwischen 5 und 200 GeV. Da die Energieauflösung des Kalorimeters näherungsweise invers proportional zur Wurzel der Energie ist (vgl. Gleichung 2.6 und Tabelle 2.2) erfolgt die Kodierung der Energie mittels einer Quadratwurzelkodierung anhand der Relation

$$P_{7Bit} = int(10 \cdot (\sqrt{E[GeV]} - \sqrt{5})) \tag{5.3}$$

Abbildung 5.13 zeigt die Kodierungsfunktion der Energie in P, Abbildung 5.15 die energieabhängige Auflösung dieser Kodierung. Durch Anpassung einer $1/sqrt(E)$- Verteilung an die energieabhängige Auflösung ergibt sich für die Energiekodierung in der Pretrigger Nachricht eine Energieauflösung von

$$\frac{\Delta E}{E} = \frac{5{,}74 \cdot 10^{-2}}{\sqrt{E[GeV]}} \tag{5.4}$$

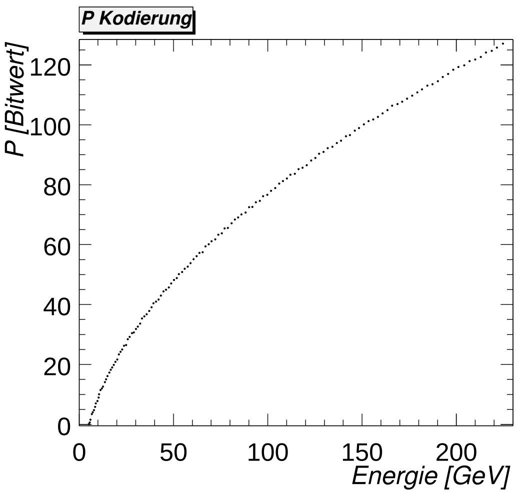


Abbildung 5.13: *Kodierung der Clusterenergie in der Variable P. Dargestellt sind die 7-Bit-Werte der Variablen P in Abhängigkeit der im Pretrigger rekonstruierten Clusterenergie.*

Einfluss der unteren Energiegrenze der Kodierung auf den Triggerschnitt

Bei der Berechnung und Kodierung der Energie in der Pretrigger Nachricht muss beachtet werden, dass diese Energie auch für die Schnitte auf die Energie des Clusters verwendet wird: Wie in Abschnitt 4.3.5 ausgeführt, verwenden die Lookuptables bei der Bestimmung der Gesamtenergie des Clusters (durch Summation der Einzelenergien) zunächst die Energiekodierung des Pretriggers die den Energiebereich von 0 GeV bis zu einer vom Kalorimeterbereich abhängigen Maximalenergie kodiert. Im letzten Schritt der Summation erfolgt neben der Berechnung der Gesamtenergie auch ein Übergang zu der oben diskutierten FLT Energiekodierung die einen Minimalenergiewert von 5 GeV besitzt. Dies bedeutet, dass Cluster, die eine geringere Energie als 5 GeV besitzen, durch die Kodierung auf den Minimalenergiewert 5 GeV gesetzt werden.
Da diese Energie des Clusters anschließend auch für den Schnitt auf die Clusterenergie verwendet wird, kann es dazu kommen, dass Cluster künstlich über die Schwelle gehoben werden. Bei der Kodierung der Energie mittels der FLT Kodierung muss deshalb darauf geachtet werden, dass die minimal kodierbare Energie nicht zu groß gewählt wird, da sonst Cluster in den Außenbereichen des Kalorimeters, sofern sie den Schnitt im Readout Board überleben, unabhängig von ihrer Energie und ihrem E_T- bzw. $KTRIG$-Wert akzeptiert werden. Abbildung 5.14 zeigt den notwendigen minimalen Energiewert der kodiert werden muss, in Abhängigkeit von der Clustertriggerschwelle eines Schnitts auf den E_T- bzw. $KTRIG$-Wert des Clusters.
Für den Schnitt auf die Energie der zentralen Zelle des Clusters spielen diese Überlegungen insofern keine Rolle, als dieser Schnitt im Readout Board durchgeführt wird und dort die Energie mit der Energiekodierung des Pretriggers kodiert ist, die den vollen Energiebereich von 0 GeV bis zur Maximalenergie abdeckt.[8]

5.4.4 Bestimmung der Clusterenergie mit Lookuptables

Wie die Kodierung der Energie in der Pretrigger Nachricht erfolgt auch die Kodierung der Energie im eigentlichen Pretrigger Algorithmus mittels einer Quadratwurzelkodie-

[8]Zusätzlich muss auch beachtet werden, dass diese Energiekodierung auch für Kodierung der Energien der Bremsstrahlungscluster verwendet wird. Da diese Cluster auch Energiewerte unterhalb von 5 GeV besitzen, empfiehlt sich generell eine Erweiterung des kodierbaren Energiebereiches.

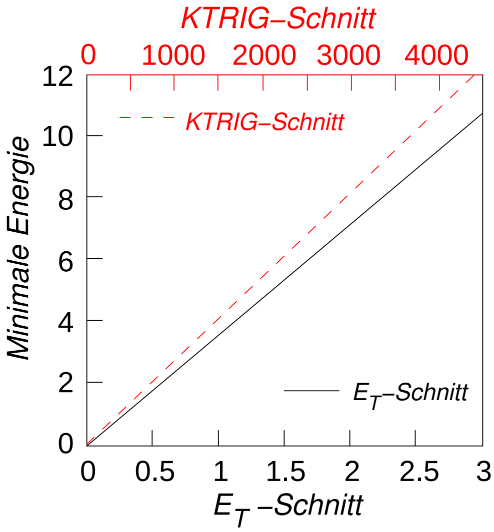


Abbildung 5.14: *Minimalenergie des Schnitts auf den E_T und KTRIG-Wert der Cluster. Dargestellt ist die notwendige Minimalenergie der FLT Energiekodierung in Abhängigkeit des Wertes des E_T- bzw. KTRIG-Schnitts auf den Cluster die notwendig ist, um im gesamten Kalorimeter den E_T- bzw. KTRIG-Schnitt anwenden zu können.*

rung anhand von Gleichung 4.9 (vgl. Abschn. 4.2.3). Im Gegensatz zur Pretrigger Nachricht muss im eigentlichen Pretrigger Algorithmus jedoch zur Summation der einzelnen Zellbeiträge auch eine Kodierung der Energie unterhalb des kinematisch rekonstruierbaren Bereichs des First Level Triggers von 5 GeV erfolgen, um Teilbeiträge der Energie korrekt zu kodieren. Darüber hinaus wird für die einzelnen Kalorimeterbereiche eine unterschiedliche Energiekodierung angewendet, um eine bessere Abdeckung der unterschiedlichen Energiebereiche zu ermöglichen. Für die Datennahmeperiode 2000 wurde der kodierbare Energiebereich für das innere Kalorimeter auf 0 bis 280 GeV, für das mittlere auf 0 bis 100 GeV und für das äußere Kalorimeter auf 0 bis 65 GeV festgelegt.
Vergleicht man die rekonstruierten Clusterenergien des idealisierten Pretrigger Algorithmus mit denen des realen Pretrigger Algorithmus durch Bestimmung der Residuen der Clusterenergien, so lässt sich der kombinierte Einfluss der Verwendung von Lookuptables und der Kodierung in der Pretrigger Nachricht studieren.
Mit Hilfe einer energieabhängigen Anpassung von Gaußverteilung an die so ermittelten Residuen wurden die Auflösungen der Kodierungen bestimmt. 5.15 zeigt die Auflösungen für die verschiedenen Kalorimeterbereiche zusammen Auflösung der Energiekodierung in der Pretrigger Nachricht mittels FLT Kodierung (Gl. 5.4). Zur Bestimmung der Auflösung der drei Kalorimeterbereiche erfolgte eine Anpassung der Funktion

$$\frac{\Delta E}{E} = \frac{C_1}{\sqrt{E}} + C_2 \tag{5.5}$$

an die Kurven in Abbildung 5.15. Tabelle 5.9 gibt die so ermittelten Energieauflösungen mit den Energiegültigkeitsbereichen an, die sich aus den Kodierungsbereichen ergibt.

Kalorimeter	C_1 [10^{-2} GeV$^{1/2}$]	C_2 [10^{-3}]	*Energiebereich* [GeV]
Inneres	11,18 ± 0,01	1,15 ± 0,01	$0 \leq \mathrm{E} \leq 280$
Mittleres	8,42 ± 0,01	1,56 ± 0,01	$0 \leq \mathrm{E} \leq 100$
Äußeres	7,93 ± 0,10	0,57 ± 0,34	$0 \leq \mathrm{E} \leq 65$

Tabelle 5.9: *Relative Energieauflösung des Pretrigger Algorithmus bei Verwendung von Lookuptables und kodierten Werten. Die angegebenen Werte sind die Parameter der Anpassung der Funktion 5.5 an die Kurven in Abbildung 5.15.*

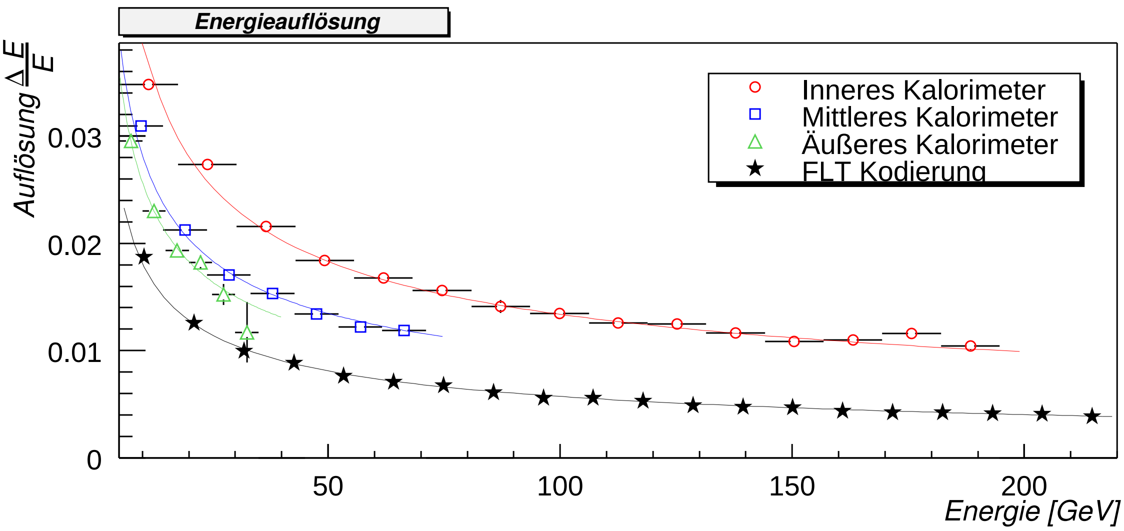


Abbildung 5.15: *Relative Energieauflösungen des Pretrigger Algorithmus als Funktion der Clusterenergie. Dargestellt sind die relativen Auflösungen des Pretrigger Algorithmus, ermittelt durch den Vergleich der mit dem idealisierten und dem realen Pretrigger rekonstruierten Energie. Als Vergleich ist zusätzlich die Auflösung der Energiekodierung des FLTs mit eingezeichnet, welche für alle Kalorimeterteile einheitlich ist (Gleichung 5.4).*

Man erkennt in Abbildung 5.15 dass die Energieauflösung durch die Verwendung von Lookuptables etwa doppelt so schlecht ist, wie die Auflösung der Energiekodierung des FLTs zur Kodierung der Energiewerte in der Pretrigger Nachricht. Die Auflösung der FLT Kodierung ist somit vollkommen ausreichend für die erreichbare Energieauflösung durch Verwendung von Lookuptables.

5.4.5 Energieauflösung des Pretriggers

Analog wie bei der Ortsauflösung (vgl. Abschnitt 5.3.5) fand zur Bestimmung der Gesamtenergieauflösung des Pretriggers sowohl ein Vergleich des realen Pretrigger Algorithmus (unter Verwendung von Lookuptables), als auch ein Vergleich des idealisierten Pretrigger Algorithmus mit den MC Werten statt. Zusätzlich wurde die Energieauflösung von CARE durch Bestimmung der Residuen zwischen den mit CARE rekonstruierten Werten und den MC Referenzwerten ermittelt.
Die Auflösung wurde wiederum durch Bestimmung der Breiten mittels Anpassung von Gaußverteilungen an die energieabhängigen Residuen ermittelt. Abbildung 5.16 zeigt die Energieauflösung für den idealisierten und den realen Pretrigger Algorithmus sowie für das Rekonstruktionspaket CARE zusammen mit den Designauflösungen (vgl. Tabelle 2.2). Die Kurven entsprechen der Anpassung der Breiten an die Funktion 5.5. Tabelle 5.10 gibt die so ermittelten Energieauflösungen für den Pretrigger, Tabelle 5.11 für das Kalorimeterrekonstruktionspaket CARE an.

5.4.6 Fazit

Durch den Vergleich des idealisierten Pretrigger Algorithmus (d. h. des reinen Algorithmus ohne Binning der Variablen und Verwendung von Lookuptables) mit dem Rekon-

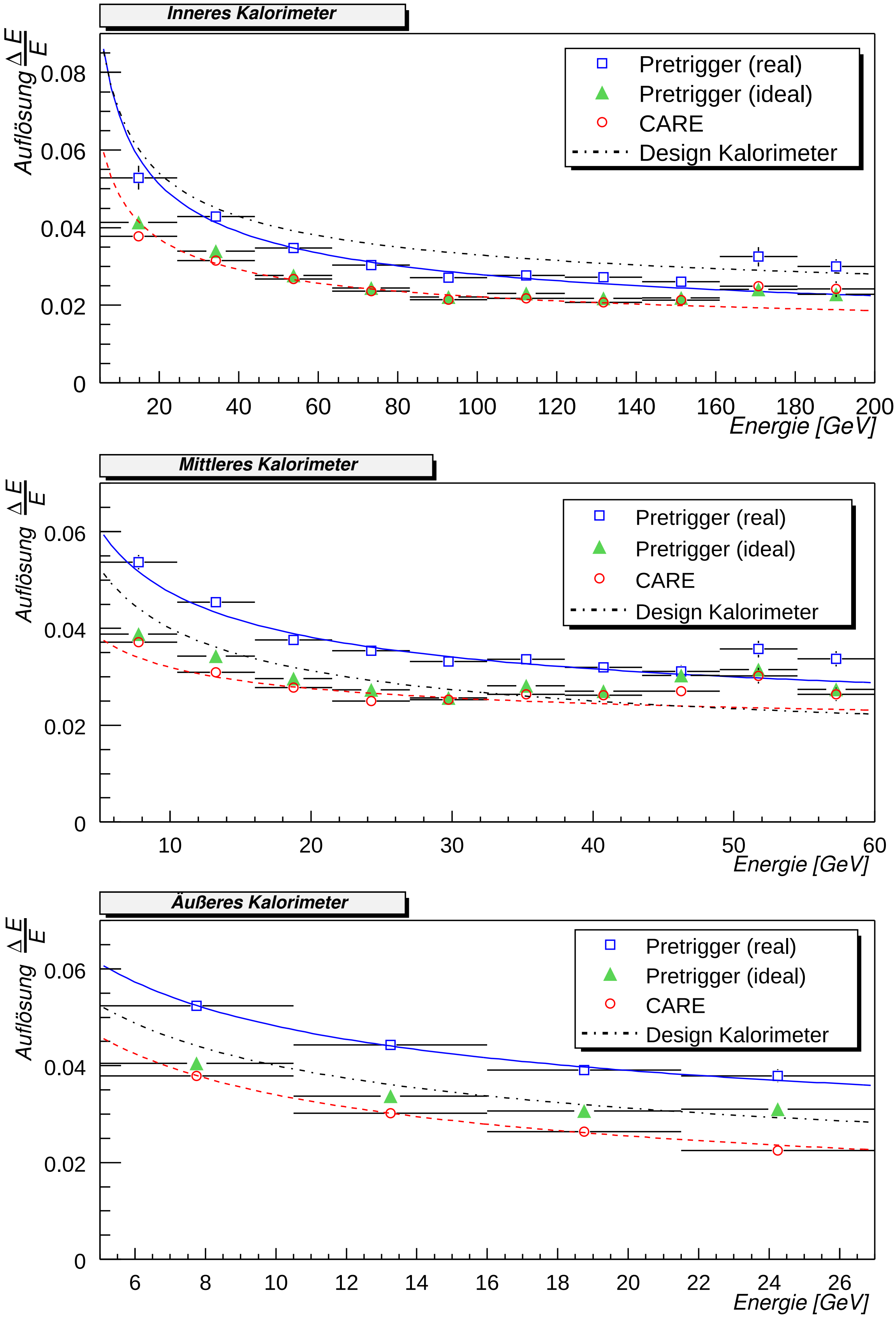


Abbildung 5.16: *Vergleich der Energieauflösungen. Dargestellt ist die Energieauflösung als Funktion der Energie für die drei Kalorimeterbereiche zusammen mit der Designauflösung (vgl. Tabelle 2.2). Die Kurven entsprechen den Anpassungen der Funktion 5.5 an die Verteilungen.*

Kalorimeter	C_1 [10^{-1} GeV$^{1/2}$]	C_2 [10^{-2}]	*Energiebereich* [GeV]
Inneres	1,82 ± 0,01	0,98 ± 0,09	$5 \leq \mathrm{E} \leq 160$
Mittleres	1,11 ± 0,04	1,32 ± 0,01	$5 \leq \mathrm{E} \leq 60$
Äußeres	0,96 ± 0,07	1,71 ± 0,21	$5 \leq \mathrm{E} \leq 26$

Tabelle 5.10: *Energieauflösung des Pretrigger Algorithmus.*

Kalorimeter	C_1 [10^{-1} GeV$^{1/2}$]	C_2 [10^{-2}]	*Energiebereich* [GeV]
Inneres	1,04 ± 0,07	1,04 ± 0,66	$5 \leq \mathrm{E} \leq 200$
Mittleres	0,45 ± 0,04	1,74 ± 0,09	$5 \leq \mathrm{E} \leq 60$
Äußeres	0,88 ± 0,04	6,17 ± 1,26	$5 \leq \mathrm{E} \leq 27$

Tabelle 5.11: *Energieauflösung des Rekonstruktionsprogramms CARE*

struktionspaket CARE wurde gezeigt, dass die Energieauflösungen des reinen Pretrigger Algorithmus vergleichbar mit denen des Rekonstruktionspaketes CARE sind. Damit ist der Einfluss der algorithmischen Beschränkungen wie der Berechnung der Clusterenergie mittels fester Clustergröße oder der getrennten Bearbeitung der drei Kalorimeterbereiche (vgl. Abschn. 5.2.1) auf die Energieauflösung vernachlässigbar.

Betrachtet man jedoch den Einfluss der technischen Umsetzung des Algorithmus wie der Verwendung von gebinnten Werten und Lookuptables für die Berechnung, Speicherung und Weitergabe der Clusterenergien (vgl. Abschnitt 5.2.2), so zeigt sich durch einen Vergleich des realen Pretrigger Algorithmus, mit dem idealisierten Pretrigger Algorithmus eine Verschlechterung der Energieauflösung im inneren und mittleren Kalorimeter um knapp 20 %, im äußeren Kalorimeter um knapp 50 %.

Wie in Abschnitt 5.4.4 diskutiert, sind die Verluste dabei hauptsächlich der Verwendung von Lookuptables und nicht der Kodierung der Gesamtenergie in der First Level Trigger Nachricht zuzuordnen. Die Clusterenergien liegen im äußeren Kalorimeter hauptsächlich im Bereich kleiner Energien unterhalb von 20 GeV. Da im Bereich kleiner Energien die Energieauflösung der Kodierung generell schlechter ist als im Bereich hoher Energien, wirkt sich die Energiekodierung hier stäker aus und führt zu der erkennbar größeren Verschlechterung der Auflösung im äußeren Kalorimeter im Vergleich zu den Verschlechterungen im inneren und mittleren Kalorimeter (vgl. Abbildung 5.15).
Eine Optimierung der Auflösung ließe sich durch eine Anpassung der Kodierung des Pretriggers auf den Energiebereich der Kodierung des First Level Triggers erreichen: Da Pretriggerenergien oberhalb der FLT Kodierungsgrenze von 220 GeV in der Pretrigger Nachricht als 220 GeV kodiert werden, wird die Information der Pretriggerenergien über 220 GeV in jedem Fall auf 220 GeV „korrigiert“. Stattdessen empfiehlt es sich, die Grenze der Pretriggerkodierung von 280 GeV auf ebenfalls 220 GeV zu senken, was der Energieauflösung im inneren Kalorimeter zugute kommen würde. Im äußeren Kalorimeter würde jedoch eine Verkleinerung des Bereichs und damit eine Verbesserung des Binnings nicht helfen, da diese Verbesserung durch die schlechtere Kodierung in der FLT Nachricht (Energiebereich 5 bis 200 GeV) wieder aufgehoben würde.[9]

[9]Auch die FLT Kodierung kann prinzipiell angepasst werden, jedoch muss hier darauf geachtet werden, dass aufgrund der einheitlichen Kodierung diese Änderung den gesamten Bereich des FLT (inklusive

Bei dem Vergleich der Auflösungen des realen und des idealisierten Pretriggeralgorithmus sowie des Rekonstruktionspaketes CARE mit den Designauflösungen (vgl. Tabelle 2.2, 5.10 und 5.11) erkennt man, dass die Auflösungen im inneren Kalorimeter über den gesamten Energiebereich vergleichbar oder besser sind, als die Designauflösungen.
Im Bereich des mittleren Kalorimeters ist die Auflösung des realen Pretrigger Algorithmus um ca. 20 % schlechter als die Designauflösung, die Auflösung des Rekonstruktionspaketes CARE ist dagegen vergleichbar mit der Designauflösung. Der Pretrigger Algorithmus erfüllt damit in diesem Bereich nicht die Designanforderung, eine Optimierung des Binnings, wie oben diskutiert, könnte hier helfen.
Im äußeren Kalorimeter zeigt sich ein ähnliches Bild wie im mittleren Kalorimeter. Während die Auflösung des Kalorimeterrekonstruktionspaketes CARE besser als die Designauflösung ist, ist die Auflösung des realen Pretrigger Algorithmus um etwa 30 % schlechter.

Im Folgenden werden die Einflüsse der Auflösungen auf die Extrapolation der Cluster in die Superlage und die Extrapolationseffizienz untersucht.

5.5 Extrapolation der Teilchenspur in die Superlage TC02

Wie in Abschnitt 4.3.7 beschrieben, besitzt der ECAL Pretrigger neben der Aufgabe, die Schwerpunktspositionen und Energien von Spurkandidaten im Kalorimeter zu finden, die Aufgabe, die Spurkandidaten in die vor dem Kalorimeter liegende Superlage TC02 zu extrapolieren. Als Pretrigger Nachricht übergibt der Pretrigger dem First Level Trigger dazu die Größe und Position des Suchfensters in TC02 in kodierter Form.
Bei der Extrapolation vom Kalorimeter zur Superlage TC02 ist die Ladung des Teilchens noch nicht bekannt. Die Suchregion muss deshalb beide mögliche Bahnen der Teilchen berücksichtigen. Da mit zunehmender Suchregionsgröße die Raten innerhalb des FLTs steigen, sollte die Suchregion nicht unnötig groß gewählt werden. Im Folgenden werden zunächst die Extrapolation in x- und in y-Richtung und die Parametrisierung der Suchregionsbreiten vorgestellt, bevor die Extrapolationseffizienz bestimmt wird und Möglichkeiten der Optimierung der Extrapolation untersucht werden.

5.5.1 Extrapolation in x-Richtung

Für die Extrapolation des Clusters vom Kalorimeter zur Superlage TC02 muss neben der Kinematik der beiden möglichen Bahnen auch die Rekonstruktionsgenauigkeit des Ortes und der Energie im Pretrigger berücksichtigt werden, um das Suchfenster in der Superlage TC02 optimal abzuschätzen.
Das Suchfenster Δx_{ROI} in der Superlage TC02 setzt sich deshalb aus einer festen, vom Kalorimeterbereich abhängigen, Breite w, welche die Ortsauflösung des Pretrigger Systems berücksichtigt, und dem energieabhängigen Teil $dd\xi$, der die Extrapolation anhand der Clusterenergie und die Energieauflösung berücksichtigt (Gleichung 4.19), zusammen. Nähere Einzelheiten finden sich in Abschnitt 4.3.7. Für eine Anpassung der Suchregions-

dem Muonkanal) betreffen würde.

breite müssen sowohl die Extrapolationseffizienzen als auch die zu erwartenden Raten im First Level Trigger Beachtung finden.

Parametrisierung der Breite w

Eine große Ungenauigkeit in der Ortsrekonstruktion kann dazu führen, dass die Position des Suchfensters falsch abgeschätzt wird und die Spur außerhalb des Suchfensters liegt. Die Ortsauflösung wird für die Extrapolation mittels der Größe w berücksichtigt. Die Breite w wird in Einheiten der Zellgröße w_o des jeweiligen Kalorimeterbereichs mit Hilfe des Skalierungsfaktor γ des jeweiligen Kalorimeterbereichs, der die Ortsauflösung berücksichtigt, parametrisiert (Gleichung 4.17).
Der Bit-Wert W, der die Breite w in der Pretrigger Nachricht kodiert, ist in der Pretrigger Nachricht fest auf den Wert $W = 0$ kodiert, sodass nur ein möglicher Wert pro Kalorimeterbereich zur Verfügung steht.[10] Es muss deshalb für jeden Kalorimeterbereich eine gemeinsame, energieunabhängige Breite w gewählt werden.
Der Energiebereich des First Level Triggers deckt, ausgehend von einem E_T-Cluster-Schnitt von 1 GeV im Kalorimeter einen Bereich von 5 GeV bis etwa 200 GeV ab. Da die Ortsauflösung bei 5 GeV am schlechtesten ist (vgl. Abbildung 5.16) kann die obere Grenze der Ortsauflösung unter Verwendung der in Abschnitt 5.3.5 ermittelten Ortsauflösung (Tabelle 5.5) durch Bestimmung der Ortsauflösung bei 5 GeV für die einzelnen Kalorimeterbereiche abgeschätzt werden:

$$\sigma_{inner}^{max} = (0,47 \pm 0,12)\,\mathrm{cm} \tag{5.6}$$
$$\sigma_{middle}^{max} = (0,72 \pm 0,23)\,\mathrm{cm} \tag{5.7}$$
$$\sigma_{outer}^{max} = (1,32 \pm 0,57)\,\mathrm{cm} \tag{5.8}$$

Damit entsprechen drei σ der Auflösungen etwa der Breite einer halbern Kalorimeterzelle. Für die Datennahmeperiode 2000 wurde für die Breite w der Skalierungsfaktor auf $\gamma = 0,5$ gesetzt, die Breite w entsprach also einer halben Kalorimeterzelle.

Parametrisierung der Breite $dd\xi$ und des Extrapolationswinkel $d\xi$

Die Größen $dd\xi$ und $d\xi$ berechnen sich anhand von Gleichung 4.26 und 4.27. Eine im Pretrigger im Vergleich zur wahren Energie des Elektrons zu niedrig gemessene Energie stellt für die Extrapolation insofern kein Problem dar, da durch sie die Breite der Suchregion größer abgeschätzt wird als mit der korrekten Energie, und so trotzdem beide möglichen Spuren innerhalb der Suchregion liegen. Somit stellen auch Bremsstrahlungsverluste für den Extrapolationsalgorithmus kein Problem dar.
Kommt es dagegen zu einer Überlagerung mehrerer Teilchen in einem Cluster und damit zu einer Überschätzung der wahren Energie des Teilchens, so kann die wahre Spur außerhalb des Suchbereichs liegen und wird in TC02 nicht mehr gefunden. Um Verluste dieser Art zu vermeiden, wird für die Energieabschätzung die gemessene Clusterenergie E_{TOT} künstlich um den Korrektur- bzw. Sicherheitsfaktor ρ verkleinert und die Extrapolation mit dieser korrigierten Energie durchgeführt (Gleichung 4.25).

[10] Mit Hilfe der x- und y-Position kann der Kalorimeterbereich, in dem der Cluster liegt, rekonstruiert werden und somit für jedes Kalorimeterbereich eine separate Breite gewählt werden. Die Energie ist in den entsprechenden Lookuptables nicht bekannt, sodass keine energieabhängige Parametrisierung der Breite möglich ist.

Abbildung 5.17 zeigt die Größe von $dd\xi$ in Abhängigkeit des Korrekturfaktors ρ und der Energie. Man erkennt, dass im Bereich kleiner Energien die Breite $dd\xi$ mit abnehmender Energie stark zunimmt und darüber hinaus bei Wahl eines größeren Parameters ρ in diesem Bereich ebenfalls stark anwächst. Berücksichtigt man weiter, dass w unabhängig von der Energie ist, so wird die Breite der Suchregion für kleine Energien hauptsächlich von $dd\xi$ dominiert und diese Dominanz ist umso stärker, je größer ρ gewählt wird.

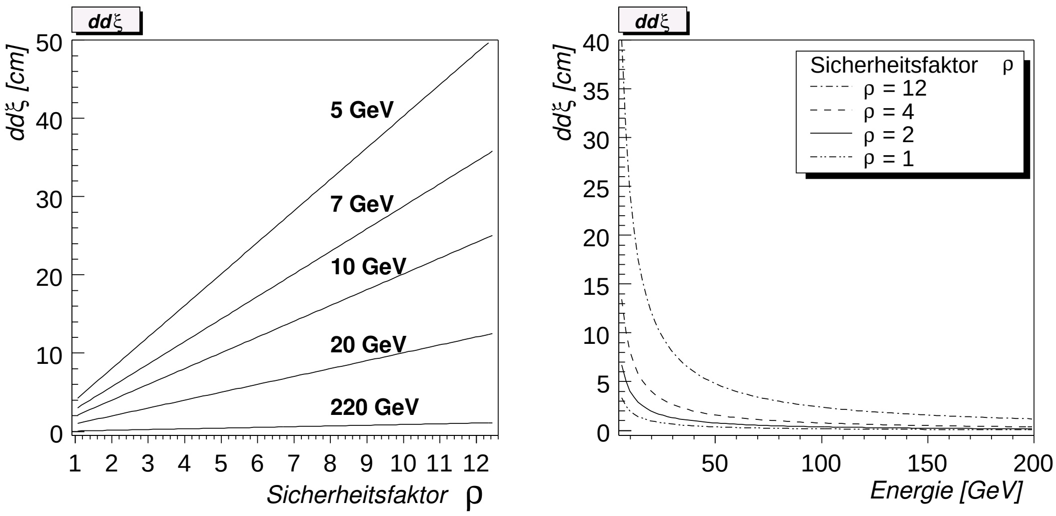


Abbildung 5.17: *Breite des Suchregionsparameters $dd\xi$ als Funktion des Energiekorrektur- bzw. Sicherheitsfaktor ρ und der Energie. Man erkennt dass die Breite $dd\xi$ insbesondere für kleine Energien stark mit ρ anwächst.*

Die Breite $dd\xi$ wird als 8-Bit-Wert $DDXI$, die Größe $d\xi$ als 8-Bit-Wert DXI an den First Level Trigger weitergereicht. Für $d\xi$ wird das höchstwertigste Bit als Vorzeichenbit verwendet. $dd\xi$ besitzt, da es sich um eine Breite handelt, nur positive Werte und kann damit alle 256 Bins zur Breitenkodierung verwenden. Tabelle 5.12 gibt die Auflösungen der Kodierung an, Abbildung 5.18 zeigt die Kodierungsfunktionen.

Variable	*Auflösung*	*Bereich*
$dd\xi$	$6{,}64 \cdot 10^{-2}$ cm	$0\,\mathrm{cm} \leq dd\xi \leq 117{,}65\,\mathrm{cm}$
$d\xi$	$(5{,}77 \cdot 10^{-5})^\circ$	$0^\circ \leq d\xi \leq (1{,}92 \cdot 10^{-2})^\circ$
	$(4{,}33 \cdot 10^{-3})^\circ$	$(1{,}92 \cdot 10^{-2})^\circ < d\xi \leq (6{,}72 \cdot 10^{-2})^\circ$

Tabelle 5.12: *Kodierung der Extrapolationsparameter $dd\xi$ und $d\xi$ zusammen mit den Auflösungen der beiden Werte.*

Für die Datennahmeperiode 2000 wurde ein Sicherheitsfaktor von $\rho = 2$ gewählt. Abbildung 5.19 zeigt die Verteilung der Suchregionsgrößen in x für die während der Datennahme gewählten Parameter γ und ρ für die drei Kalorimeterbereiche. Man erkennt, dass sich die Suchregionsgrößen jeweils aus der festen Breite einer halben Kalorimeterzellbreite und einer energieabhängigen Breite zusammensetzen.

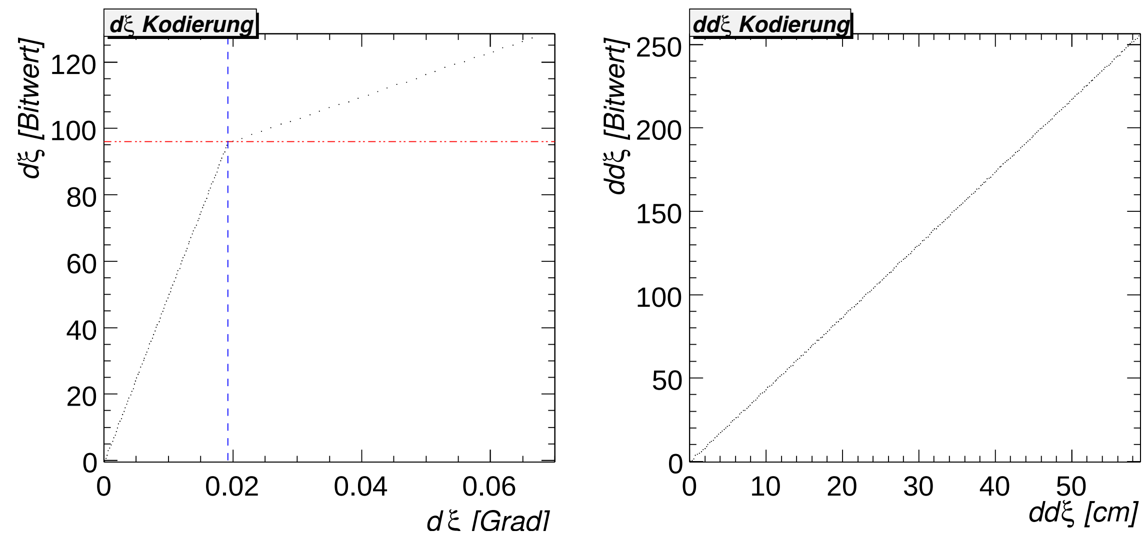


Abbildung 5.18: *Kodierung der Extrapolationsparameter $dd\xi$ und $d\xi$. Dargestellt sind die Kodierungsfunktion der Breite $dd\xi$ in den 8-Bit-Wert DDXI und die Kodierungsfunktion des Öffnungswinkels $d\xi$ in den 8-Bit-Wert DXI.*

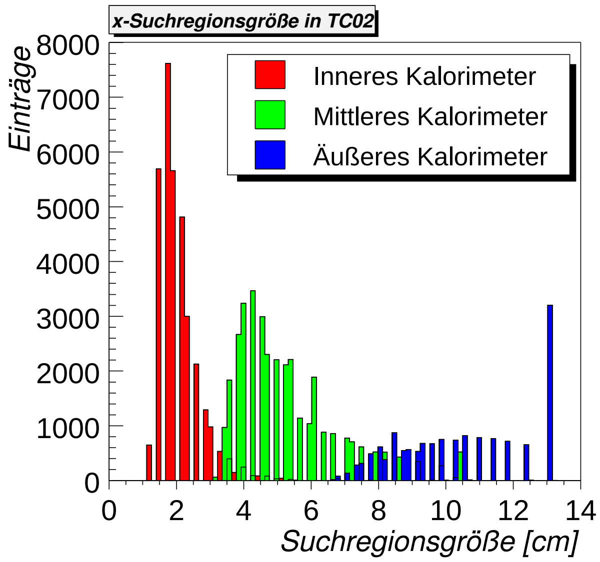


Abbildung 5.19: *Suchregionsgrößen in x-Richtung in der Superlage TC02. Dargestellt ist die Verteilung der Suchregionsgrößen für die verschiedenen Kalorimeterbereiche für die Einstellungen der Datennahmeperiode 2000. Die Suchregionsgröße setzt sich aus der halben Zellbreite des entsprechenden Kalorimeterbereichs und einer energieabhängigen Breite zusammen.*

5.5.2 Extrapolation in y-Richtung

In y-Richtung findet keine Ablenkung der Teilchenbahn im Magnetfeld statt. Dies bedeutet, dass man nicht mehr zwischen den beiden Ladungen für die Extrapolation unterscheiden muss, da ein Teilchen unabhängig von der Ladung denselben Weg genommen hat. Die Suchregion in der Superlage TC02 liegt in erster Näherung symmetrisch um die zurückprojizierte y-Clusterposition. In y-Richtung definiert sich die Breite der Suchregion durch die Zellgröße y_o der Detektorzelle in der Superlage TC02. Nähere Einzelheiten zur Extrapolation finden sich in Abschnitt 4.3.7.
Tabelle 5.13 gibt die Suchregionsgröße in y für die verschiedenen Spurkammerbereiche an. Man erkennt, dass die Suchregionsgrößen weitaus größer als die Ortsrekonstruktionsgenauigkeit des Pretriggers sind und damit die Ortsauflösung des Pretriggers kein Problem darstellen sollte.

Spurkammerbereich	*Suchregionsgröße*
Innere Spurkammer	5,71 cm
Äußere Spurkammern (5 mm Bereich)	11,43 cm
Äußere Spurkammern (10 mm Bereich)	22,86 cm

Tabelle 5.13: *y-Suchregionsgrößen in der Superlage TC02. Im Gegensatz zu den Suchregionsgrößen in x, hängen die Suchregionsgrößen in y nur von dem entsprechenden Spurkammerbereich ab.*

5.5.3 Optimierung der Suchregion in TC02

Um zu untersuchen, wie effizient die Extrapolation ist, wurde zunächst die MC Position in der Superlage TC02 mit den maximalen und minimalen Positionen der vom Pretrigger bestimmten Suchregion in TC02 in x und y für die Einstellungen der Datennahmeperiode 2000 verglichen und geprüft, ob die MC Position innerhalb des Suchfensters liegt und somit ob die Spur gefunden werden kann.

Abbildung 5.20 zeigt die relativen Positionen der MC Werte der Elektronen im Vergleich zur Suchregion in TC02 für $\gamma = 0,5$ und $\rho = 2$. Dabei wurde die Skalierung der x-Achse so gewählt, dass die Grenzen der Suchregionen bei ± 1 liegen. Spuren, die innerhalb der Suchregion liegen, besitzen Einträge innerhalb des Bereichs zwischen -1 und +1, bei Einträgen außerhalb dieses Bereichs liegt die wahre Spur außerhalb des Suchbereichs.

Man erkennt, dass die beiden Teilchenarten – Elektronen und Positronen – jeweils aufgrund der entgegengesetzten Krümmung ihrer Spuren an den entgegengesetzten Rändern der Suchregion in x zu liegen kommen. Da in y-Richtung keine Ablenkung im Magnetfeld stattfindet, liegen sie im Bereich der Suchregion in y zentral in der Mitte der Suchregion. Für die Extrapolation in y liegen alle Spuren aufgrund der geringeren Anforderungen innerhalb des Suchbereichs, für die x-Extrapolation jedoch nicht. Es ergibt sich eine

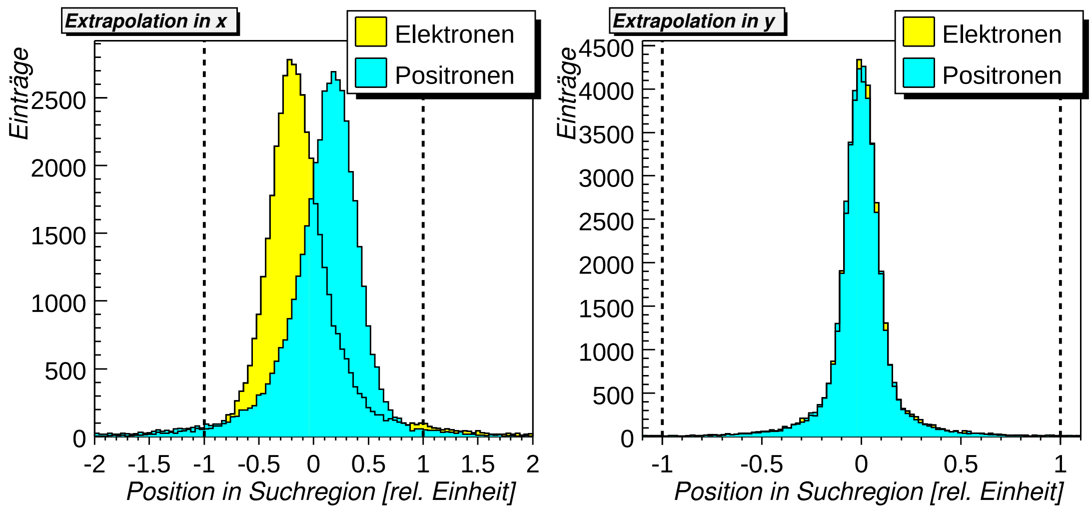


Abbildung 5.20: *MC Positionen in TC02 relativ zur Suchregion in TC02. Die Skalierung der x-Achse wurde so gewählt, dass die Grenzen der Suchregionen bei ± 1 liegen. Spuren, die innerhalb der Suchregion liegen, besitzen Einträge innerhalb des Bereichs zwischen -1 und +1, bei Einträgen außerhalb dieses Bereichs liegt die wahre Spur außerhalb des Suchbereichs.*

Gesamtextrapolationseffizienz $\epsilon_{Extrapol}$ von $\epsilon_{Extrapol} = (96,4 \pm 0,1)\,\%$ pro Elektron.
Um zu untersuchen, ob die Orts- oder die Energieungenauigkeit den größeren Einfluss auf die Rekonstruktionseffizienz besitzt, wurde der Extrapolationsort in Abhängigkeit von der Orts- und Energieungenauigkeit betrachtet. Im Falle der Energieungenauigkeit zeigte sich keine Abhängigkeit der Rekonstruktionseffizienz von der Energieungenauigkeit: So befanden sich die Bahnen der Cluster, deren Energie exakt rekonstruiert wurde, in gleichem Maße innerhalb und außerhalb des Extrapolationsfenster wie Cluster, deren Energie mit einer großen Ungenauigkeit bestimmt wurde. Dagegen zeigte sich bei der Ortsrekonstruktion ein deutlicher Zusammenhang zwischen der Größe der Ungenauigkeit der Ortsrekonstruktion und der Extrapolationseffizienz. Abbildung 5.21 zeigt die Abhängigkeit der Extrapolation von der Ungenauigkeit der Ortsrekonstruktion. Man erkennt, dass Cluster, die einen großen Unterschied zwischen der wahren und der rekonstruierten Position aufweisen, vermehrt Einträge außerhalb der Suchregion besitzen.

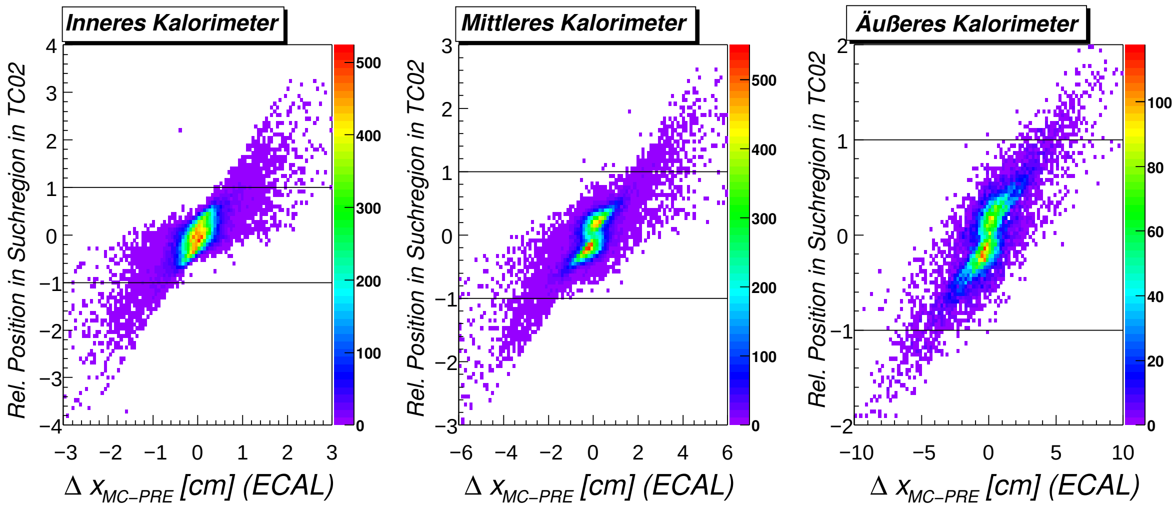


Abbildung 5.21: *Abhängigkeit der Extrapolation von der Ortsrekonstruktionsgenauigkeit. Einträge zwischen -1 und +1 kennzeichnen Teilchen, bei denen die MC Positionen innerhalb des Suchbereichs liegen, Einträge unterhalb und oberhalb der beiden Linien, Teilchen, die durch den Extrapolationsalgorithmus nicht gefunden werden.*

Die Breite der Suchregion in TC02 lässt sich durch die beiden Faktoren γ und ρ steuern, wobei γ die Ortsauflösung und ρ die Energieüberschätzung berücksichtigt. Abbildung 5.22 zeigt die Abhängigkeit der Extrapolationseffizienz von dem Sicherheitsfaktor ρ für verschiedene Skalierungsfaktoren γ. Man erkennt einen von γ abhängigen Übergang in die Sättigung. Für $\gamma = 1$ nimmt die Effizienz z. B. für ρ-Werte oberhalb von 6 kaum zu. Auf der anderen Seite ist der Verlauf der einzelnen Effizienzkurven für γ-Werte oberhalb von 1,0 fast gleich.
Abbildung 5.23 zeigt die Extrapolationseffizienz in Abhängigkeit von γ für verschiedene Sicherheitsfaktoren ρ für die verschiedenen Kalorimeterbereiche. Man erkennt einen vom Sicherheitsfaktor ρ abhängigen Übergang in die Sättigung. Eine weitere Steigerung der Effizienz ist dann nur durch eine Erhöhung des Sicherheitsfaktors ρ zu erreichen.
Nimmt man die Werte $\rho = 2$ und $\gamma = 0,5$ der Datennahmeperiode 2000, so kann man in den Diagrammen die maximale Effizienz und damit den Verlustanteil durch die beiden Parameter abschätzen: In Abbildung 5.23 erkennt man, dass mit einem Sicherheitsfaktor von $\rho = 10$ eine Effizienz von nahezu 100 % erreichbar ist, mit einem Sicherheitsfaktor

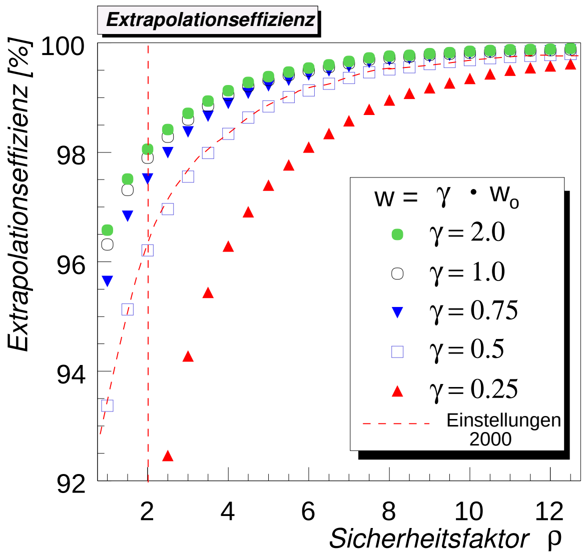


Abbildung 5.22: *Abhängigkeit der Extrapolationseffizienz von dem Sicherheitsfaktor ρ für verschiedene Grundbreiten w.*

$\rho = 2$ jedoch nur eine maximale Effizienz von 98 %. Somit können 2 % der Verluste dem Faktor ρ und damit einer Überschätzung der Energie zugeordnet werden.

Vergleicht man die beiden Kurven mit $w = 0,5 \cdot w_o$ und $w = 2,0 \cdot w_o$ in Abbildung 5.22 bei einem Wert von $\rho = 2$, so lassen sich die restlichen 2 % dem Faktor γ und damit der Ortsunschärfe zurechnen: Während mit einer Breite $w = 2,0 \cdot w_o$ bei einem Wert von $\rho = 2$ eine Effizienz von 98 % erreicht wird, erreicht man mit der Breite $w = 2,0 \cdot w_o$ nur eine Effizienz von 96 %.

5.5.4 Fazit

Für die Einstellungen der Datennahmeperiode 2000 beträgt die Effizienz der Extrapolation des Cluster vom Kalorimeter zur Superlage TC02 (96,35 ± 0,1) % pro Elektron. Dabei zeigte siche eine deutliche Abhängigkeit der Extrapolationseffizienz von der Ortsrekonstruktionsungenauigkeit

Um Verluste durch die Ortsauflösung des Pretriggers zu minimieren, empfiehlt es sich, die Breite w so zu vergrößern, dass man sich in dem Sättigungsbereich der Kurven in Abbildung 5.23 befindet. Bei einem Sicherheitsfaktor ρ von 2, erreicht man dies durch Wahl des Faktors $\gamma = 1$. Dies würde die Effizienz auf 98 % erhöhen.

Da die Breite w für einen Wert von $\gamma = 0,5$ ungefähr die Hälfte der Gesamtsuchregionsbreite ausmacht (vgl. Abbildung 5.19), würde eine Verdoppelung von $w = \gamma \cdot w_o = 0{,}5\ w_o$ auf $w = 1{,}0\ w_o$ zu einer durchschnittlichen Verbreiterung der Suchregion um 25 % führen. Eine weitere Vergrößerung des Faktors γ wirkt sich nicht mehr weiter auf die Extrapolationseffizienz aus.

Eine Vergrößerung des Sicherheits- und Extrapolationsfaktor ρ ist aufgrund der stark zunehmenden Breite für kleine Energien (vgl. Abbildung 5.17) weitaus kritischer. Eine zusätzliche Verdoppelung des Faktors ρ vpn $\rho = 2$ auf $\rho = 4$ würde die Effizienz von 98 % auf 99 % steigern.

Studien, haben gezeigt, dass eine derartige Vergrößerung der Suchregion die Ausgangsrate der Track Finding Units der Superlage TC02 um etwa 5 % erhöhen würde [Fle 01a].

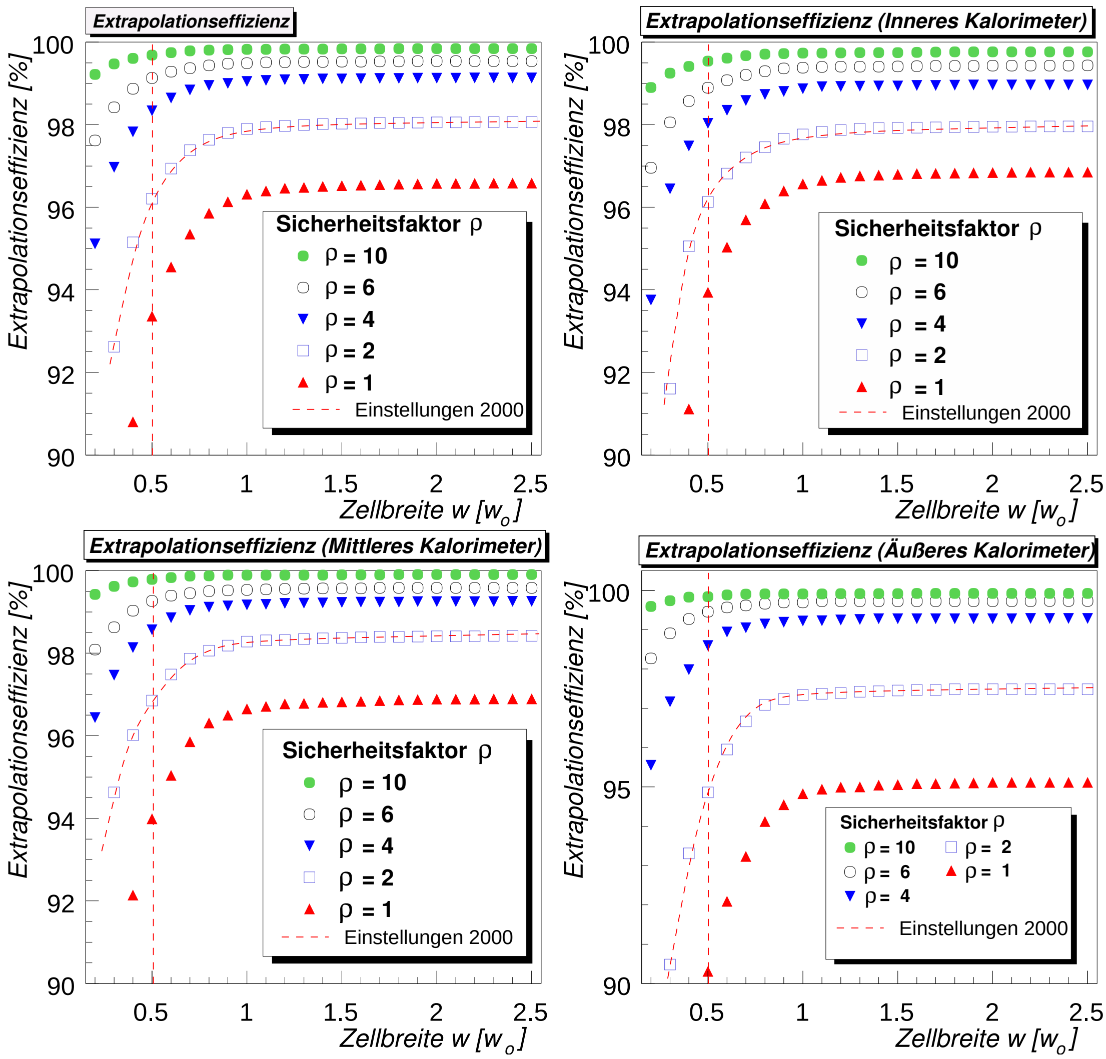


Abbildung 5.23: *Abhängigkeit der Extrapolationseffizienz von dem Breitenskalierungsfaktor γ für die verschiedenen Kalorimeterbereiche für verschiedene Energiesicherheitsfaktoren ρ.*

5.6 Pretriggerschnitte und Pretriggereffizienzen

Zur Reduktion der Clusterzahl, die an den First Level Trigger zur Spursuche übergeben werden, findet im ECAL Pretrigger zwei Schnitte statt: Ein Schnitt auf die Energie der zentralen Zelle im Readout Board dient zur Reduzierung der Anzahl an im Pretrigger Board zu bearbeitenden Clustern. Gleichzeitig soll dieser Schnitt möglichst keinen Effizienzverlust hervorrufen, indem er im Idealfall nur Cluster verwirft, welche die Triggerschwelle für den Cluster ebenfalls nicht passieren würde. Im Pretrigger Board erfolgt nach der Rekonstruktion der Cluster der eigentliche Pretrigger Schnitt auf die Gesamtenergie eines Clusters und damit die Entscheidung, ob ein gefundener Clusterkandidat an den First Level Trigger zur Spursuche weitergegeben wird.
Sowohl für den Schnitt auf die zentrale Zelle im Readout Board als auch für den Schnitt auf den gesamten Cluster im Pretrigger Board, kann der Schnitt mittels eines Transversalenergieschnitts E_T (Gleichung 4.2) oder dem so genannten KTRIG Schnitt (Gl. 4.3), der zusätzlich die Ablenkung der Teilchen im Magneten berücksichtigt, erfolgen. Nähere Einzelheiten zu den Triggerschnitten finden sich in Abschnitt 4.1.1.

5.6.1 Berechnung der Gesamteffizienz des Pretriggers

Die totale Effizienz ϵ_{Tot} des Pretrigger Algorithmus setzt sich aus der geometrischen Akzeptanz ϵ_{Geo} des Pretriggers, der Rekonstruktionseffizienz des Pretriggers ϵ_{Pre} und der Extrapolationseffizienz $\epsilon_{Extrapol}$ der Extrapolation des Cluster in die Superlage TC02 zusammen:

$$\epsilon_{Tot} = \epsilon_{Geo} \cdot \epsilon_{Pre} \cdot \epsilon_{Extrapol} \ . \tag{5.9}$$

Die Rekonstruktionseffizienz ϵ_{Pre} des Pretriggers setzt sich wiederum aus einer generellen Clusterrekonstruktionseffizienz ϵ_{Reco} sowie einer, vom Schnittwert auf den Cluster abhängigen, Effizienz $\epsilon_{Cluster}$ und einer vom Schnittwert auf die zentrale Zelle abhängigen Effizienz ϵ_{Zelle} zusammen:

$$\epsilon_{Pre} = \epsilon_{Reco} \cdot \epsilon_{Cluster} \cdot \epsilon_{Zelle} \ . \tag{5.10}$$

Im Folgenden werden für die einzelnen Effizienzen jeweils sowohl die Effizienzen für den Nachweis eines Leptons als auch die Effizienzen für den Nachweis beider Leptonen des Zerfalls $J/\psi \to e^+e^-$ angegeben: Als *Leptoneffizienz* wird, sofern nicht anders erwähnt, jeweils die Effizienz für den Nachweis eines Leptons des Zerfalls $J/\psi \to e^+e^-$ bezeichnet, als *Einzelleptoneffizienz* die Effizienz zum Nachweis mindestens eines Leptons pro Ereignis des Zerfalls $J/\psi \to e^+e^-$ und als *J/ψ-Effizienz* die Effizienz des Nachweises beider Leptonen des Zerfalls $J/\psi \to e^+e^-$.
Bezeichnet ϵ_o die Leptoneffizienz, ϵ_1 die Einzelleptoneneffizienz und ϵ_2 die Nachweiseffizienz beider Leptonen pro Ereignis, so gilt

$$\epsilon_1 = 2\epsilon_o - \epsilon_o^2 \tag{5.11}$$
$$\text{und} \quad \epsilon_2 = \epsilon_o^2 \ , \tag{5.12}$$

sofern die beiden Leptonen nicht korreliert sind. Da jedoch die beiden Leptonen nicht vollkommen unkorreliert sind, gelten die Gleichungen nur näherungsweise. Im Folgenden werden die zu erwartenden Effizienzen und Pretriggerraten ermittelt und diskutiert.

5.6.2 Geometrische Akzeptanz

Die geometrische Akzeptanz bzw. Effizienz ϵ_{Geo} ist zum einen abhängig von der Geometrie des Kalorimeters, zum anderen von der Abdeckung des Kalorimeters mit Readout- und Pretriggerelektronik. Während der Datennahmeperiode 2000 wurde die Abdeckung des Kalorimeters mit der Elektronik schrittweise vervollständigt. Tabelle 5.14 fasst die Effizienzen für das komplette Kalorimeter und für einige Teilszenarien zusammen. Man erkennt, dass bei einem voll ausgestattetem Kalorimeter der Pretrigger eine geometrische Akzeptanz von etwa 62 % für den Nachweis beider Leptonen des Zerfalls $J/\psi \to e^+e^-$ erreicht wird.

5.6.3 Triggerschnitt auf die zentrale Zelle des Clusters

Jedes Pretrigger Board ist in der Lage, maximal drei Clusterkandidaten pro BX zu rekonstruieren, im Mittel sollte die Anzahl der zu verarbeitenden Cluster pro Board nicht größer als eins sein. Der Schnitt auf die zentrale Zelle muss deshalb die Anzahl der Clusterkandidaten auf diese Anzahl reduzieren. Dem Schnitt liegt die Annahme zugrunde,

	Inneres	Mittleres	Äußeres	Inneres & Mittleres	Komplettes Kalorimeter
Einzellepton	$58,7 \pm 0,2$	$43,6 \pm 0,2$	$14,5 \pm 0,1$	$81,7 \pm 0,1$	$96,6 \pm 0,1$
Lepton	$36,5 \pm 0,1$	$30,6 \pm 0,1$	$12,0 \pm 0,1$	$67,1 \pm 0,1$	$79,1 \pm 0,1$
J/ψ	$14,8 \pm 0,1$	$9,3 \pm 0,1$	$1,9 \pm 0,1$	$44,6 \pm 0,2$	$61,9 \pm 0,2$

Tabelle 5.14: *Geometrische Effizienz des Kalorimeters in Prozent aufgeschlüsselt nach den verschiedenen Kalorimeterbereichen und -kombinationen.*

dass die zentrale Zelle des Clusters im Normalfall den weitaus größten Teil der Clusterenergie beinhaltet. Abbildungen 5.24 (a) und (b) verdeutlichen dies: Aufgetragen ist die Transversalenergie (bzw. der KTRIG-Wert) der zentralen Zelle gegenüber der Gesamttransversalenergie (Gesamt-KTRIG-Wert) des Clusters für Leptonen des Zerfalls $J/\psi \to e^+e^-$. Die diagonalen Linien entsprechen den Einträgen, bei denen die zentrale Zelle genau die Hälfte der Energie besitzt. Man erkennt, dass die meisten Cluster oberhalb dieser Linie liegen und so mehr als 50 % ihrer Energie in der zentralen Zelle enthalten.
Für die Datennahmeperiode 2000 fand für die zentrale Zelle ein Schnitt bei dem halben Schnittwert der Transversalenergie statt, der für den Gesamtcluster verwendet wurde: Für die zentralen Zellen der Cluster wurde eine Transversalenergie von 0,5 GeV, für die Cluster eine Transversalenergie von 1,0 GeV gefordert. Abbildung 5.24 (c) und (d) zeigen die Effizienz ϵ_{Zelle} als Funktion des Schnittwertes des Zell-Transversalenergie-Schnitts. Tabelle 5.15 fasst die relativen Effizienzen des während der Datennahmeperiode 2000 verwendeten Triggerschnitts von $E_{T_{Zelle}} \geq 0{,}5$ GeV (bei einem Schnitt auf die Clustertransversalenergie von $E_{T_{Cluster}} \geq 1{,}0$ GeV) und den im Proposal [Loh 94] für die dortigen Studien verwendeten KTRIG-Schnitt von $KTRIG_{Zelle} \geq 350$ GeV·cm (bei einem Schnitt auf die Clusterenergie von $KTRIG_{Cluster} \geq 700$ GeV·cm) zusammen.

	$\epsilon_{Zelle_{E_T}}$ [%]	$\epsilon_{Zelle_{KTRIG}}$ [%]
Einzellepton	98,7±0,1	99,1±0,1
Lepton	98,1±0,1	98,4±0,1
J/ψ	95,7±0,2	96,5±0,2

Tabelle 5.15: *Relative Effizienzen des Schnitts auf die Energie der zentralen Zelle für einen Schnitt von $E_{T_{Zelle}} \geq 0,5$ GeV (bei einem Clusterenergieschnitt von $E_{T_{Cluster}} \geq 1,0$ GeV) bzw. für einen Schnitt von $KTRIG_{Zelle} \geq 350$ GeV·cm (bei einem Clusterenergieschnitt von $KTRIG_{Cluster} \geq 700$ GeV·cm).*

Readout Board Rate

Um den Einfluss auf die Triggerrate bzw. die Anzahl an Clusterkandidatenzellen für die ECAL Pretrigger Boards zu untersuchen, wurden inelastische Ereignisse mit Wechselwirkungsraten von 5, 10, 20 und 40 MHz durch Überlagerung von einem halben, einem, zwei bzw. vier Wechselwirkungen (poissonverteilt) pro BX simuliert.
Abbildung 5.25 zeigt die mittlere Kandidatenzahl pro BX und pro Pretrigger Board als Funktion des Pretriggerschnitts. Man erkennt, dass die mittlere Zahl an Kandi-

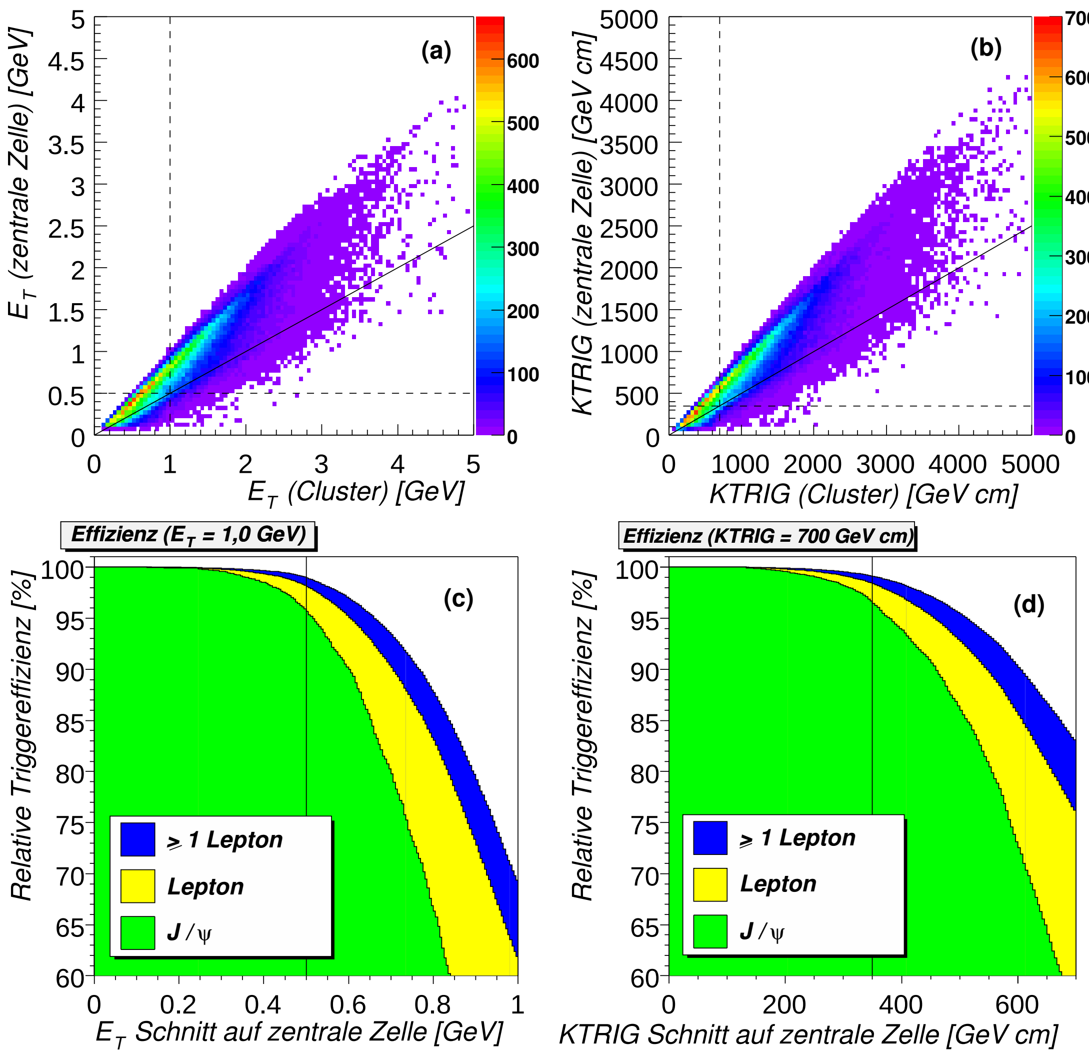


Abbildung 5.24: *Effizienzverluste durch Schnitt auf den Transversalenergiewert bzw. den KTRIG-Wert der zentralen Zellen. (a) und (b): Dargestellt ist der E_T (KTRIG)-Wert der zentralen Zelle gegenüber dem E_T (KTRIG)-Wert des Clusters. Zur Verdeutlichung des Schnitts im Readout System kennzeichnen die diagonalen Linien Cluster, die genau die Hälfte ihrer Energie in der zentralen Zelle besitzen. Die beiden senkrechten und waagerechten Linien entsprechen den während der Datennahmeperiode 2000 verwendeten Triggerschnitten im Readout und Pretrigger System. (c) und (d): Relative J/ψ-Effizienz durch den Schnitt auf die zentrale Zelle bei einem Schnitt auf die Transversalenergie der Cluster von $E_T = 1.0$ GeV bzw. einen Cluster-KTRIG-Wert von 700 GeV·cm.*

daten selbst bei hohen Raten um mehr als eine Größenordnung unter der maximal möglichen durchschnittlichen Kandidatenzahl von eins liegt. Für einen Schnittwert von 0,5 GeV liegt sie sogar zwei Größenordnungen unter dieser maximalen Kandidatenzahl, damit ist auch der Verlust durch das gleichzeitige Auftreten von mehr als drei Kandidaten pro BX und Pretrigger Board vernachlässigbar.

Insgesamt gesehen liegen die Verluste durch den Schnitt im Readout Board nur im Bereich weniger Prozente und die Anzahl an markierten Kandidaten pro BX stellt keine Limitierung für das Pretrigger System dar.

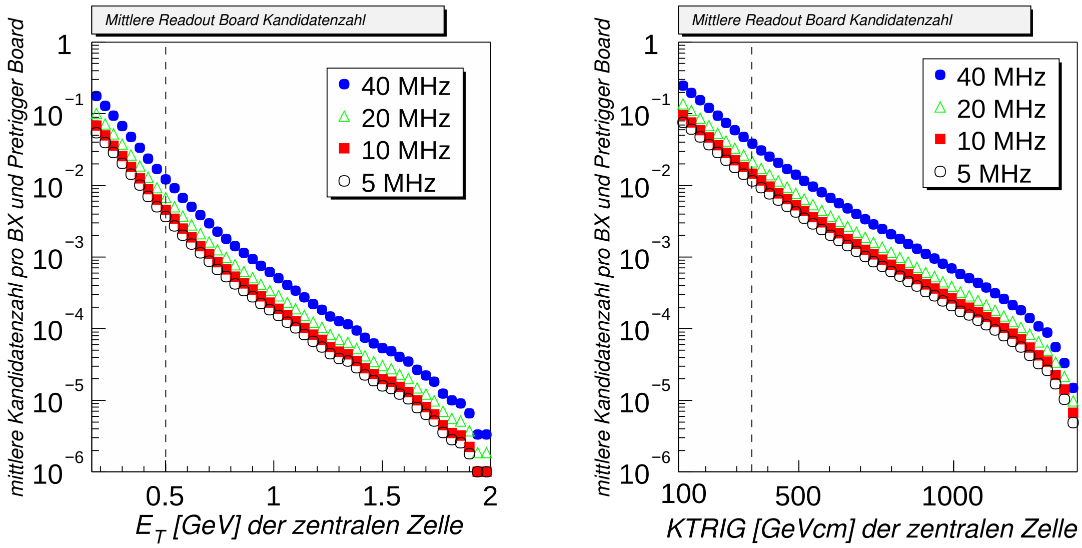


Abbildung 5.25: *Anzahl der Cluster Kandidaten des Readout Systems. Dargestellt ist die mittlere Anzahl der vom Readout Board markierten Clusterkandidaten pro Board als Funktion des E_T- bzw. KTRIG-Schnitts auf die zentrale Zelle.*

5.6.4 Pretriggereffizienz und Pretrigger Rate

Die Rekonstruktionseffizienz ϵ_{Reco} des Pretriggers ist ein Maß für die generelle Effizienz der Clusterrekonstruktion des Pretriggers unabhängig von den einzelnen Clusterschnitten. Aus technischen Gründen wurde die generelle Pretriggereffizienz ϵ_{Reco} bei einem Schnittwert von $E_T \geq 0,1$ GeV ermittelt, enthält also bereits einen Minimal-E_T-Schnitt. Tabelle 5.16 fasst die einzelnen Rekonstruktionseffizienzen zusammen.

	ϵ_{Reco} [%]
Einzellepton	92,8 ± 0,1
Lepton	84,0 ± 0,2
J/ψ	70,3 ± 0,3

Tabelle 5.16: *Rekonstruktionseffizienzen des ECAL Pretriggers.*

Abbildung 5.26 zeigt die vom Wert des Schnitts auf die Clusterenergie abhängige Effizienz $\epsilon_{Cluster}$ zusammen mit den E_T- bzw. *KTRIG*-Spektren der beiden Leptonen. Tabelle 5.17 fasst die Effizienzen für einen Schnitt auf die Transversalenergie des Clusters von $E_T \geq$ 1,0 GeV bzw. den KTRIG-Wert des Clusters von $KTRIG \geq 700$ GeV·cm zusammen.

	$\epsilon_{Cluster_{E_T}}$ [%]	$\epsilon_{Cluster_{KTRIG}}$ [%]
Einzellepton	70,6 ± 0,2	83,2 ± 0,1
Lepton	58,0 ± 0,2	74,5 ± 0,2
J/ψ	33,6 ± 0,3	56,6 ± 0,3

Tabelle 5.17: *Relative Effizienzen des Schnitts auf die Energie des Clusters für einen Schnitt von $E_{T_{Cluster}} \geq 1,0$ GeV bzw. $KTRIG_{Cluster} \geq 700$ GeV·cm.*

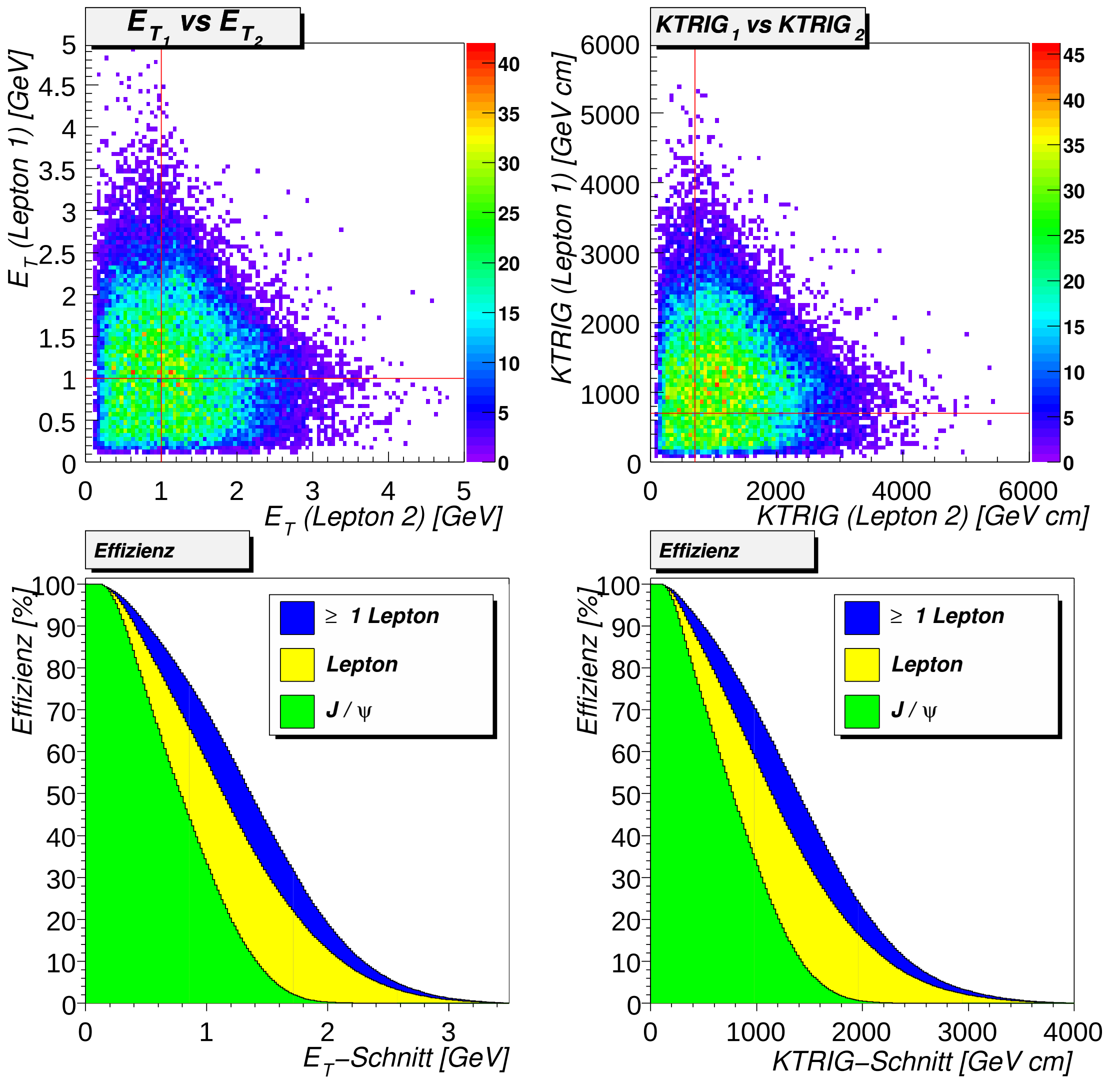


Abbildung 5.26: *Relative Effizienz $\epsilon_{Cluster}$ des Schnitts auf die Clusterenergie. In den beiden oberen Abbildungen sind die E_T bzw. KTRIG Spektren der beiden Leptonen gegeneinander dargestellt, in den beiden unteren die relativen Effizienzen des entsprechenden Schnitts auf die Clusterenergie. Die angegeben Effizienzen sind die reinen Effizienzen des Clusterschnitts ohne Rekonstruktionseffizienz ϵ_{Reco}, die Effizienz ϵ_{Zelle} des Schnitts auf die zentrale Zellen des Clusters (vgl. Abschn. 5.6.3) und die Extrapolationseffizienz (vgl. Abschn. 5.5).*

Um zu untersuchen, in wieweit die in Abschnitt 5.3.4 und 5.4.4 diskutierten Beschränkungen Einfluss auf die Effizienz des Pretriggers besitzen, fand ein Vergleich der Effizienzen des realen Pretrigger Algorithmus mit den Effizienzen des idealisierten Pretrigger Algorithmus und den Effizienzen des rekonstruktionspaketes CARE statt. Tabelle 5.18 gibt die Effizienzen der drei Algorithmen an. Die angegeben Effizienzen sind die reinen Rekonstruktionseffizienzen ohne die geometrische Akzeptanz. Alle Effizienzen wurden bei einem Transversalenergieschnitt von 1,0 GeV auf die Clusterenergie ermittelt.

Man erkennt, dass alle drei Rekonstruktions Algorithmen die gleiche Effizienz besitzen und insbesondere dass der Pretrigger Algorithmus nahezu die gleichen Effizienzen wie CARE besitzt. Somit besitzt keine der Beschränkungen des Pretrigger Algorithmus größeren Einfluss auf die Effizienz.

	Einzellepton	Lepton	J/ψ
Realer Pretrigger	$64{,}7 \pm 0{,}2$	$47{,}8 \pm 0{,}2$	$22{,}6 \pm 0{,}2$
Idealisierter Pretrigger	$64{,}5 \pm 0{,}2$	$47{,}8 \pm 0{,}2$	$23{,}4 \pm 0{,}2$
Rekonstruktionspaket CARE	$65{,}1 \pm 0{,}2$	$48{,}6 \pm 0{,}2$	$23{,}5 \pm 0{,}2$

Tabelle 5.18: *Vergleich der Rekonstruktionseffizienzen (in Prozent) des realen Pretrigger Algorithmus, des idealisierten Pretriggeralgorithmus und des Kalorimeter Rekonstruktionspaketes CARE. Alle Effizienzen beinhalten einen Schnitt auf die Transversalenergie des Clusters von* $E_T \geq 1{,}0$ *GeV.*

Tabelle 5.19 fasst die kombinierten Effizienzen der geometrische Akzeptanz, die Effizienzen des Zell- und des Clusterschnitts sowie die Extrapolationseffizienz zusammen.

	E_T-*Schnitt*	*KTRIG-Schnitt*
Einzellepton	$(60{,}6 \pm 0{,}3)$ %	$(71{,}7 \pm 0{,}2)$ %
Lepton	$(36{,}4 \pm 0{,}3)$ %	$(47{,}0 \pm 0{,}4)$ %
J/ψ	$(13{,}1 \pm 0{,}6)$ %	$(22{,}4 \pm 0{,}5)$ %

Tabelle 5.19: *Pretriggergesamteffizienzen für den* E_T *und KTRIG-Schnitt. Die Effizienzen beinhalten die geometrische Akzeptanz, die Effizienzen des Zell- und Clusterschnitts sowie die Extrapolationseffizienz. Bei dem* E_T*-Schnitt wurden Schnitte von* $E_{T_{Zelle}} \geq 0{,}5$ *GeV und* $E_{T_{Cluster}} \geq 1{,}0$ *GeV berücksichtigt, bei dem KTRIG-Schnitt wurden Schnitte von* $KTRIG_{Zelle} \geq 350$ *GeV·cm und* $KTRIG_{Cluster} \geq 700$ *GeV·cm berücksichtigt.*

Pretriggerrate

Um die Rate des ECAL Pretriggers abzuschätzen, wurden analog wie in Abschnitt 5.6.3 zur Bestimmung der Rate des Readout Systems Wechselwirkungsraten von 5, 10, 20 und 40 MHz durch Überlagerung inelastischer Untergrundereignisse simuliert.
Abbildung 5.27 zeigt die Pretrigger Raten in Abhängigkeit des Schnitts auf die Clustertransversalenergie bzw. den KTRIG-Wert des Clusters. Für die Untersuchungen wurde der Schnitt auf die zentrale Zelle jeweils so gewählt, dass er dem halben Wert des entsprechenden Schnitts auf die Clustertransversalenergie bzw. den Cluster-KTRIG-Wert entsprach. Man erkennt bei einem Transversalenergieschnitt von $E_T \geq 1$ GeV eine mittlere Kandidatenzahl von 0,11 pro BX, was einer Pretriggerrate von 0,97 MHz entspricht. Abbildung 5.28 zeigt den Vergleich des E_T-Schnitt mit dem $KTRIG$-Schnitt für verschiedene Wechselwirkungsraten. Man erkennt, dass der E_T-Schnitt im Allgemeinen eine leicht höhere Effizienz besitzt als der entsprechende $KTRIG$-Schnitt bei derselben Pretrigger Rate. Um bei einer bestimmten Pretriggerrate eine maximale Effizienz zu erhalten, empfiehlt es sich deshalb, für die Datennahme den Schnitt auf die E_T-Werte zu verwenden.
Wie in Abschnitt 4.3.11 diskutiert, beträgt die rein vom ECAL Pretrigger aus mögliche maximale Rate 90 MHz oder 9 Kandidaten pro BX. Diese maximale Rate geht von einer gleichmässigen Verteilung der Kandidaten in den Pretrigger Boards auf die 9 Pretrigger Crates auf, die jeweils maximal einen Kandidaten pro BX weiterleiten können. Da dies im Allgemeinen nicht der Fall ist, liegt die maximale Rate niedriger.

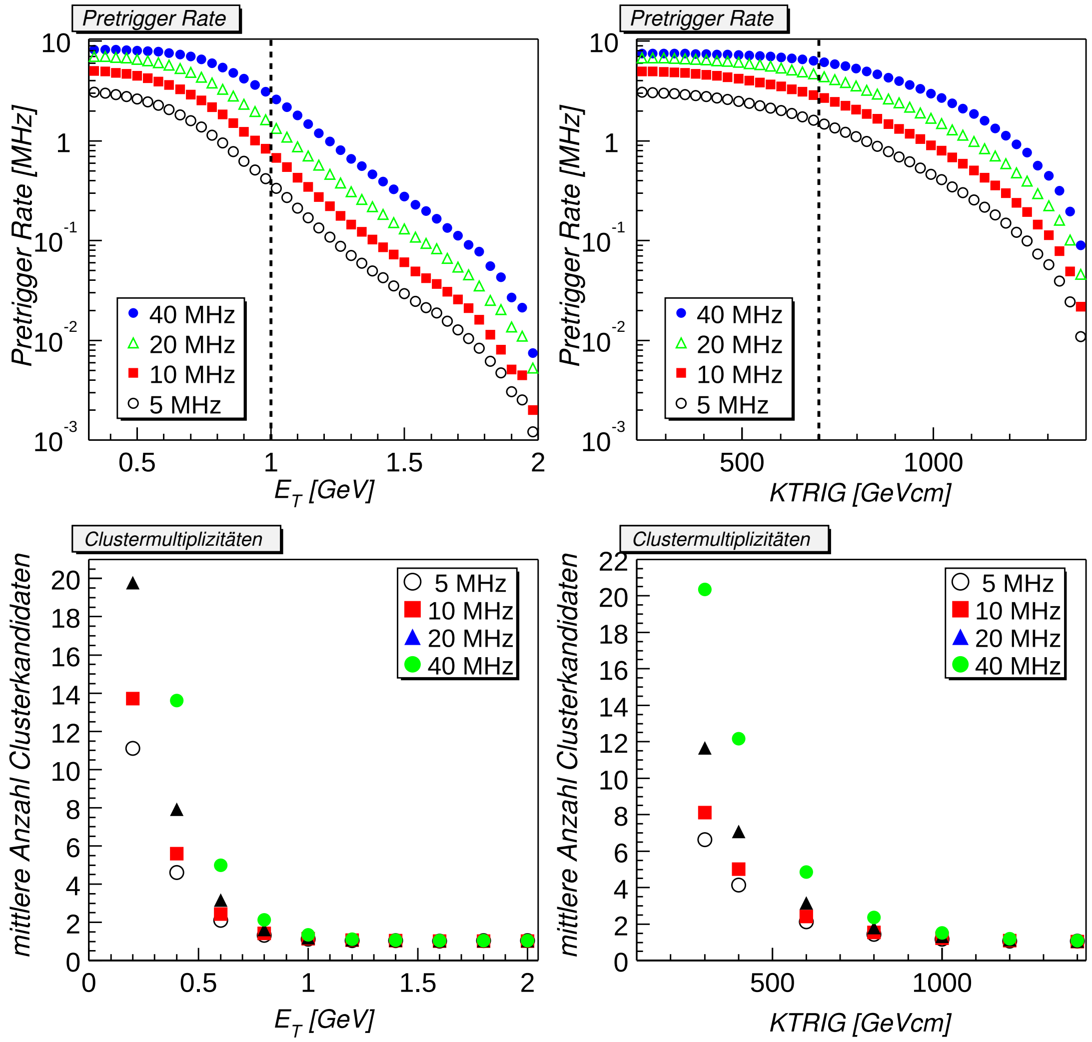


Abbildung 5.27: *ECAL Pretrigger Rate und Pretrigger Clustermultiplizitäten. Dargestellt ist die in den beiden oberen Abbildungen die Pretriggerrate in Abhängigkeit des E_T- bzw. KTRIG-Schnitts und in den beiden unteren Abbildungen die mittlere Anzahl an Clustern in Abhängigkeit der beiden Schnitte.*

Bei der maximal möglichen Pretrigger Rate muss weiterhin der maximal erreichbare Reduktionsfaktor des First Level Triggers und die maximal mögliche Eingangsrate der zweiten Triggerstufe von 50 kHz berücksichtigt werden: Im Proposal wird von einer Reduktionsrate von 200 bei einer mittleren Eingangsrate von 2 ECAL Pretriggerkandidaten ausgegangen. Dieser Reduktionsfaktor beeinhaltet neben der Spursuche auch die Kombinierung von Leptonpaaren, sowie einen Schnitt auf deren invariante Masse [Loh 94].
Während der Datennahmeperiode 2000 arbeitete die erste Trigger Stufe die meiste Zeit im sogenannten Einzelspurmodus, d. h. es fand keine Kombination von Spurpaaren und keine Berechnung der invarianten Masse mit entsprechenden Triggerschnitten statt. Dementsprechend lag die Reduktionsrate der ersten Triggerstufe auch wesentlich unter dem Designwert von 200: Messungen ergaben einen Reduktionsfaktor von 17 [HER 01].
Auch für die Datennahmeperiode 2001/2 ist geplant, die erste Triggerstufe in diesem Modus zu verwenden, sodass die maximal mögliche Pretrigger Rate auch für diese Datennahme entsprechend eingeschränkt ist: Geht man von einem Reduktionsfaktor von 20

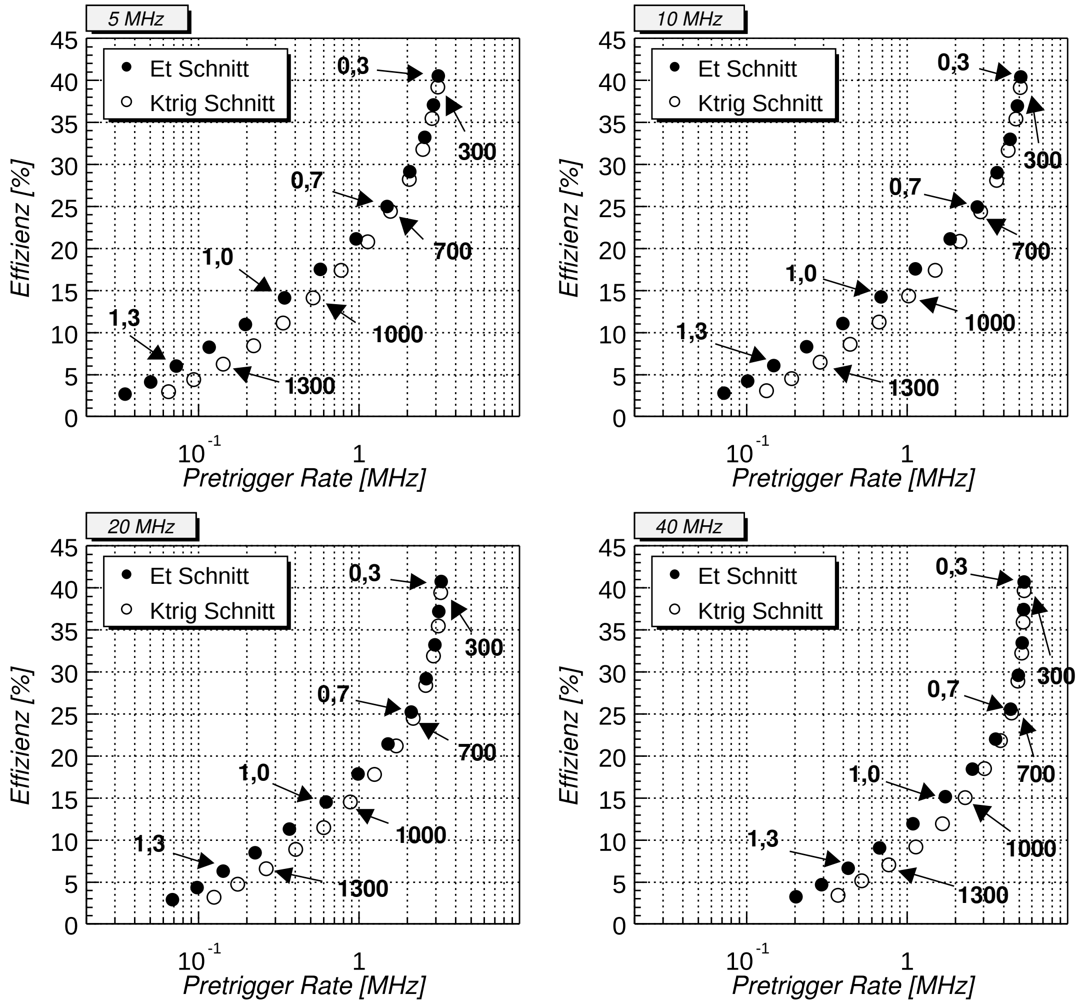


Abbildung 5.28: *Vergleich des* KTRIG *mit dem E_T-Triggerschnitt*

und einer maximalen Eingangsrate der zweiten Triggerstufe von 30 kHz aus, so ergibt sich bei gleichzeitiger Verwendung von Elektron- und Myonpretrigger eine maximale Rate für den ECAL Pretrigger von etwa 300 kHz. Für diese Pretrigger Rate ist bei voll ausgestattetem Kalorimeter ein Triggerschnitt von etwa $E_T \geq 1{,}15$ GeV notwendig. Die erreichbare Gesamteffizienz für diesen Schnitt beträgt ungefähr 10 %.

5.7 Fazit

In diesem Kapitel wurde die Konfiguration, die Funktion sowie das Leistungsverhalten des ECAL Pretriggers mit Hilfe der im Rahmen dieser Arbeit entwickelten Simulation EcalSIM untersucht.
Es wurde gezeigt, dass die algorithmischen Beschränkungen wie die Clusterrekonstruktion mittels einer festen Clustergröße, der Schwerpunktsberechnung des Clusters mittels des zentralen Kreuzes und die Aufspaltung des Kalorimeters in drei separate Teile (vgl. Abschn. 5.2.1) nur einen sehr geringen Einfluss auf die Orts- und Energieauflösung besitzen: Die Auflösungen verschlechtern sich um maximal 10 %. Damit haben sie auch keinen Einfluss auf die Extrapolations- und Triggereffizienz des Pretriggers.

Die Umsetzung des Algorithmus mittels eines Systems aus Lookuptables und gebinnten Werten zur Berechnung, Speicherung und Weitergabe der Clustervariablen führt dagegen in einigen Bereichen – insbesondere im inneren Kalorimeter – zu einer Verschlechterung der Auflösungen. Dies bedeutet, dass entweder das Suchfenster für den First Level Trigger in der Superlage TC02 größer gewählt werden muss, was zu einer Vergrößerung der Raten des First Level Triggers führen kann, oder Einbußen in der Extrapolationseffizienz und damit in der Triggereffizienz eingegangen werden müssen.
Die Suchregionsgröße lässt sich über die Skalierungsfaktoren γ und ρ des First Level Triggers steuern – für die Datennahmeperiode 2000 betrug $\rho = 2$ und $\gamma = 0,5$. Bei diesen Werten beträgt die Extrapolationseffizienz 96 %. Durch Anpassung dieser beiden Werte lässt sich die Effizienz auf etwa 98 % erhöhen, die Suchregionen vergrößern sich dadurch um etwa 50 %. Der dadurch verursachte Ratenzuwachs im First Level Trigger beträgt etwa 5 %.

Die Pretriggerschnitte betrugen $E_T \geq 0,5\,\mathrm{GeV}$ für die zentrale Zelle des Clusters, $E_T \geq 1,0\,\mathrm{GeV}$ für den Gesamtcluster. Mit voll ausgestattetem Kalorimeter lässt sich bei einer Wechselwirkungsrate von 5 MHz damit eine Gesamtpretriggereffizienz von (13,1 ± 0,6) % bei einer Pretriggerrate von etwa 1,2 MHz erreichen.
Ein Vergleich des Schnitts auf den E_T-Wert und des Schnitts auf den $KTRIG$-Wert zeigte, dass die beiden Schnittarten weitgehend vergleichbar sind, der E_T-Schnitt jedoch leicht höhere Effizienzen liefert und somit in den kommenden Datennahmen Verwendung finden sollte.
Die endgültig erreichbaren Pretriggereffizienzen hängen jedoch stark von dem Schnitt auf die Clusterenergie und damit von der erlaubten Pretriggerrate ab.

Kapitel 6

Vergleich der Simulation *EcalSIM* mit Online Daten

In Kapitel 4 wurde der Aufbau des ECAL Pretriggers und die Umsetzung in der Pretrigger Simulation *EcalSIM* vorgestellt. Die Simulation *EcalSIM* hat das Ziel, die in der Pretrigger Hardware erzeugten Pretrigger Nachrichten bitgenau zu reproduzieren bzw. zu simulieren.
Benutzt man zur Simulation des Pretriggers die im Experiment gemessenen ADC-Werte der Kalorimeterzellen, so lässt sich durch einen Vergleich der online gemessenen Pretrigger Nachrichten mit den simulierten Nachrichten die Genauigkeit der Beschreibung der Hardware durch die Simulation bestimmen.
Prinzipiell können die auftretenden Unterschiede zwischen den gemessenen und den simulierten Nachrichten zwei Bereichen zugeordnet werden: Auf der einen Seite stellt jede Simulation im Allgemeinen nur eine Näherung der Wirklichkeit dar. Im Falle von *EcalSIM* handelt es sich zwar um eine hardwarenahe Simulation, welche die im Pretrigger verwendete Logik und Algorithmen bitgenau beschreibt. Auf der anderen Seite spiegelt die Simulation den Fall einer optimal funktionierenden Hardware wider, was in der Realität nicht immer der Fall ist. Effekte wie Rauschen oder Bitfehler können, wenn überhaupt, nur näherungsweise simuliert werden. Somit lassen sich durch einen Vergleich zwischen der Simulation und der im Experiment gemessenen Daten auch Fehlfunktionen der Hardware aufzeigen.
In diesem Kapitel soll zunächst auf die für die Untersuchung verwendeten *Pretrigger Effizienz Runs* bezüglich des Setups und der Bedingungen im Pretrigger, die für eine genaue Reproduktion des Pretriggers in der Simulation erforderlich sind, eingegangen werden. Anschließend erfolgt die Beschreibung des Vergleiches der Simulation mit den Online Daten und die Diskussion der Beschreibungseffizienzen im Hinblick auf Unterschiede zwischen der Simulation und der Hardware sowie Fehlfunktionen der Hardware.

6.1 Pretrigger Effizienz Run

Das ECAL Pretrigger System wurde in der Datennahmeperiode 2000 schrittweise durch den Einbau der einzelnen Readout und Pretrigger Boards komplettiert. Um die Effizienz des Pretriggers zu messen, wurde während dieser Zeit ca. einmal monatlich ein spezieller *Pretrigger Effizienz Run* durchgeführt, der sich sowohl für die Untersuchungen der Funktionsfähigkeit der im Experiment eingebauten Hardware als auch zur Charakterisierung der Simulation aus verschiedenen Gründen hervorragend eignet.

Für eine genaue Beschreibung des Kalorimeters ist u. a. die Kenntnis der Kalibration der einzelnen Zellen sowie der Zustand[1] der einzelnen Zellen wichtig. Deshalb wurden für die Pretrigger Effizienz Runs im Allgemeinen unmittelbar vor dem Run mit Hilfe von speziellen Kalibrationsruns die Kalibrationskonstanten auf den aktuellen Stand gebracht und die Lookuptables der Readout Boards neu erzeugt.[2] Zusätzlich erfolgte auch eine Aktualisierung der Maskierung der im Readout und im Pretrigger Board nicht korrekt funktionierenden Kanäle.

Insbesondere die Maskierung heißer[3] und rauschbehafteter Pretriggerkanäle nahm während der Datennahmeperiode stetig zu. Dies lag weniger an der Zunahme schadhafter Kanäle, als vielmehr an optimierten Testmethoden zur Bestimmung dieser schadhaften Kanälen. Runs, die zeitlich eher am Strahlzeitende liegen, zeigen somit auch wesentlich saubere Bedingungen, als Runs am Anfang dieser Datennahmeperiode.

Im normalen Triggersetup steht die Pretrigger Nachricht im Second Level Trigger (SLT) und den höheren Triggerstufen nicht mehr zur Verfügung, da die Nachricht durch die Spursuche im First Level Trigger (FLT) sukzessive aktualisiert wird (vgl. Abschn. 3.5.3). Da ein Vergleich der Hardware Cluster mit den simulierten Clustern jedoch die Kenntnis dieser Nachricht erfordert, musste im FLT ein spezieller Setup gewählt werden, der die Pretrigger Nachricht unverändert lässt. In diesem so genannten *transparenten Modus* wird im FLT statt der Spursuche in den einzelnen Superlagen die Pretrigger Nachricht durch die FLT Elektronik unverändert hindurch gereicht und als FLT Nachricht an den SLT weitergegeben. Da die FLT Nachricht bei akzeptierten Ereignissen zusammen mit den Rohereignisdaten gespeichert wird, steht die Pretrigger Nachricht so zur weiteren Analyse und somit zum Vergleich mit den simulierten Clustern zur Verfügung.

Um Ereignisse mit Kalorimeter Clustern anzureichern, deren E_T-Wert oberhalb der gefoderten Schwelle liegt, und trotzdem einen vom Pretrigger weitgehend unbeeinflussten Datensatz zu erzeugen, wurde der SLT so eingestellt, dass die Triggerentscheidung auf rekonstruierten Kalorimeter Clustern und Pretrigger Clustern beruhte. Im SLT fand dazu mittels ONLINE-CARE[4] eine Kalorimeterrekonstruktion statt. Da zwar der Pretrigger eine Bearbeitung der Ereignisse auf der vollen Bunchcrossingrate ermöglicht, die Kalorimeterrekonstruktion mittels ONLINE-CARE im SLT und insbesondere die dazu erforderliche Anforderung der Kalorimeterdaten aber zu zeitintensiv ist, um sie auf der vollen Bunchcrossingrate durchzuführen, fand am Eingang des SLT eine Ratenreduzierung mittels eines Zufallstriggers mit 10 kHz statt, der die Bearbeitung des Ereignisses im SLT triggerte [Bru 01]. Ein durch diesen Zufallstrigger ausgewähltes Ereignis wurde akzeptiert, sofern es mindestens einen durch ONLINE-CARE rekonstruierten Cluster oder einen Pretrigger Cluster mit einer Transversalenergie oberhalb der eingestellten Schwelle besaß.

Auf den höheren Triggerstufen wurden keine weiteren Triggerschnitte durchgeführt. Ab-

[1]installiert – funktionstüchtig/maskiert

[2]Die Aktualisierung der Kalibrationskonstanten erfolgt für den SLT und die höheren Triggerstufen für jeden Run, für den Pretrigger jedoch im Allgemeinen nur einmal pro Woche.

[3]Unter heißen Kanälen versteht man Kanäle, die eine wesentlich größere Belegungsdichte aufweisen, als der Durchschnitt der Kanäle um den entsprechenden Kanal herum.

[4]Bei dem Paket handelt es sich um die vereinfachte Online Version des Rekonstruktionspaketes CARE das auch normalerweise im SLT zur Kalorimeterrekonstruktion verwendet wird [Vil 97a].

bildung 6.1 zeigt die prinzipielle Schaltung der verschiedenen Triggerstufen.

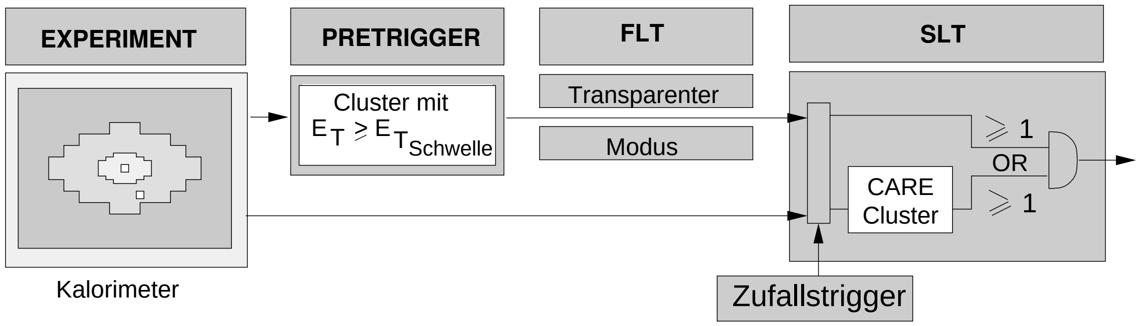


Abbildung 6.1: *Trigger Setup der Pretrigger Effizienz Runs.*

6.1.1 Run 17195

Zum Ende der Datennahmeperiode hin wurde ein Run mit fast vollständig eingebautem Readout und Pretrigger System genommen, der die beste Näherung des vollständigen Pretrigger Systems darstellt. Der Run enthält knapp 245.000 getriggerte Ereignisse die bei einer Wechselwirkungsrate von $(5,0 \pm 0,2)$ MHz genommen wurden. Tabelle 6.1 gibt einen Überblick über die wichtigsten Daten des Runs.

Run	17195
Datum	21. August 2000
Anzahl Ereignisse	254224
Prozentsatz getriggerter Ereignisse	96 %
Targetrate	(5,0 ± 0,2) MHz
Triggersetup	
First Level Trigger	transparent
Second Level Trigger	CARE Cluster mit $E_T \geq 1{,}0\,\mathrm{GeV}$ oder Pretrigger Cluster
Höhere Triggerstufen	kein Triggerschnitt

Tabelle 6.1: *Runbedingungen für den Run 17195. Für den weiteren Triggersetup siehe auch Abschnitt 6.1, für die Pretriggerbedingungen Tabelle 6.3.*

Pretrigger Setup

Abbildung 6.2 zeigt die Belegungsdichte der online gefundenen Pretrigger Cluster und somit die Pretriggerbedeckung für die drei Kalorimeterbereiche. Man erkennt, dass das komplette innere Kalorimeter, das mittlere Kalorimeter bis auf Board 0x7A (vgl. Abb. 4.12) und das äußere Kalorimeter zur Hälfte mit Pretrigger Boards abgedeckt war. Gleichzeitig erkennt man ebenfalls einige weiße Flecken, die auf nicht funktionierende Readout Boards sowie maskierte Kanäle hinweisen. Abbildung 6.3 zeigt die im Readout System maskierten Kanäle, Abbildung 6.4 die im Pretrigger System maskierten Kanäle.

Tabelle 6.2 gibt einen Überblick über die Anzahl der maskierten Kanäle und die prozentuale Abdeckung.

Run 17195	Kalorimeter			
	Inneres	Mittleres	Äußeres	Total
Gesamtkanäle	2100	2128	1728	5956
Readout System	[%]	[%]	[%]	[%]
Abdeckung durch Readout Boards	100	100	80	94,2
Maskierte Kanäle	9,8	6,4	14,8	10,0
Nutzbarer Bereich	90,2	93,6	65,2	84,2
Pretrigger System	[%]	[%]	[%]	[%]
Abdeckung durch Pretrigger Boards	100	98,0	51,3	68,3
Maskierte zentrale Kanäle (Gesamt)	5,4	8,9	7,1	7,2
Maskierte rauschbehaftete Kanäle	2,5	6,7	5,3	4,8
Maskierte Kanäle mit Bitfehler	2,9	2,2	1,8	2,4
Maskierte Randkanäle mit Bitfehler	4,5	4,6	2,2	3,6
Nutzbarer Bereich	94,6	89,1	44,2	61,1
Gesamtes System	[%]	[%]	[%]	[%]
Abdeckung	100	100	51,3	68,3
Maskierte Kanäle	14,4	14,9	21,2	16,5
Nutzbarer Bereich	85,6	85,1	30,1	51,8

Tabelle 6.2: *Kalorimeter Abdeckung des Pretriggers aufgeschlüsselt nach Readout und Pretrigger System Bedeckung sowie maskierten Kanälen für den Run 17195. Die Prozentzahlen beziehen sich jeweils auf die Gesamtkanalzahl des entsprechenden Kalorimeterbereichs ohne kinematische Gewichtung. (Für die Verteilung der Pretrigger und Readout Boards sowie die maskierten Kanäle siehe Abb. 6.3 bzw. 6.4.)*

Für die Datennahme wurde die Lookuptable Version V-00-11 verwendet, d. h. für die Schwerpunktsposition erfolgte wie in CARE eine S-Shape-Korrektur (vgl. Abschn. 4.3.6). Der Triggerschnitt erfolgte auf eine Transversalenergie von 0,5 GeV für die zentrale Zelle des Clusters und 1,0 GeV für den gesamten Cluster. Die Summation der Energie erfolgte dabei nur mit den unmittelbaren Nachbarzellen ohne Verwendung der diagonalen Eckzellen also nur im *Kreuz* und nicht im kompletten 3×3 *Nonett* (vgl. Abschn. 4.3.4). Tabelle 6.3 gibt einen Überblick über die Pretrigger Einstellungen.

6.2 Vergleich der Simulation mit den Daten des Run 17195

Um eine möglichst genaue Beschreibung der im Experiment vorliegenden Bedingungen zu bekommen, wurde bei dem Vergleich für die Simulation die gleiche Kalibration verwendet, die im Experiment zur Erzeugung der Readout Lookuptables und damit zur Konversion der im Kalorimeter gemessenen ADC Werte benutzt wurde. Darüber hinaus wurde die gleiche Maskierung verwendet, die auch im Experiment zur Maskierung nicht korrekt funktionierender Kalorimeter-, Readout- und Pretriggerkanäle verwendet wurde.

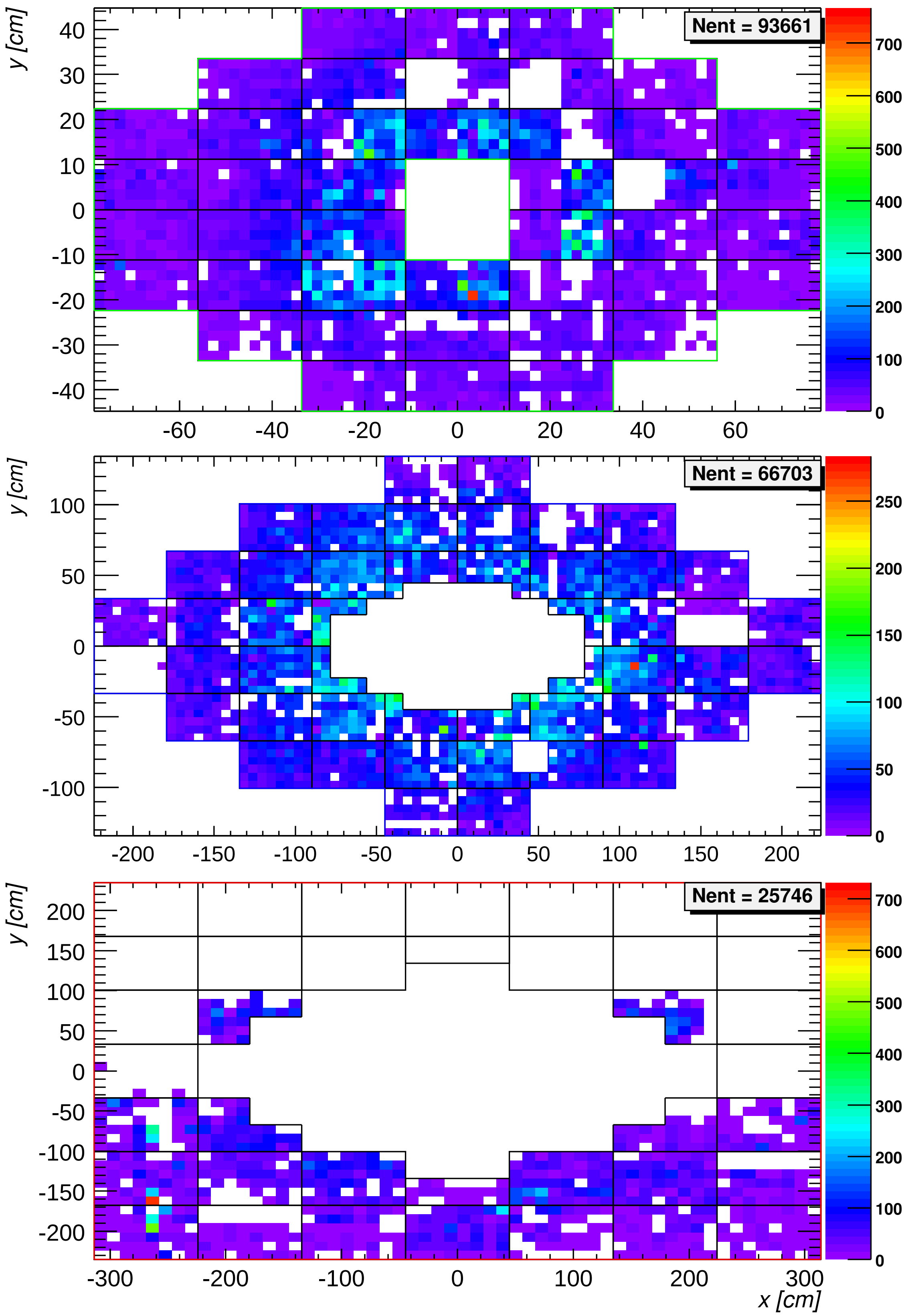


Abbildung 6.2: *Pretrigger Belegungsdichte und Pretriggerbedeckung (Run 17195). Dargestellt sind die zentralen Zellen der online gefundenen Cluster für das innere (oberes Histogramm), das mittlere (mittleres Histogramm) und das äußere Kalorimeter (unteres Histogramm). Die Unterteilung innerhalb der Histogramme stellt jeweils die Bereiche der einzelnen Pretrigger Boards dar. Kleine weiße Bereiche weisen auf nicht funktionierende Zellen, größere weiße Bereiche auf nicht installierte Boards hin.*

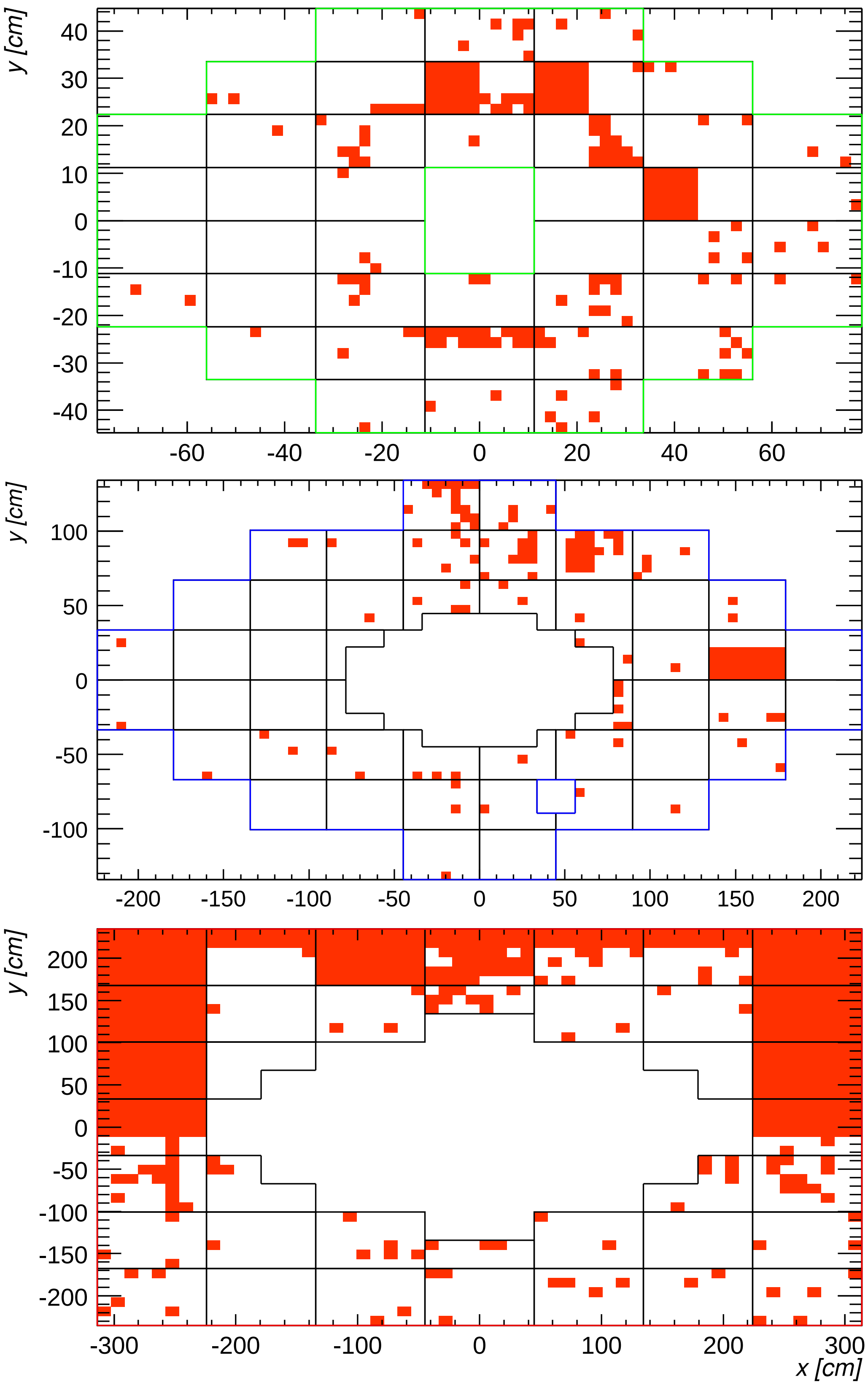


Abbildung 6.3: *Maskierte Kanäle im Readout System (Run 17195). Gezeigt sind die maskierten bzw. nicht mit Ausleseelektronik ausgestatteten Kanäle (farbig markiert) des Readout Systems für das innere Kalorimeter (oberes Bild), das mittlere Kalorimeter (mittleres Bild) und das äußere Kalorimeter (unteres Bild).*

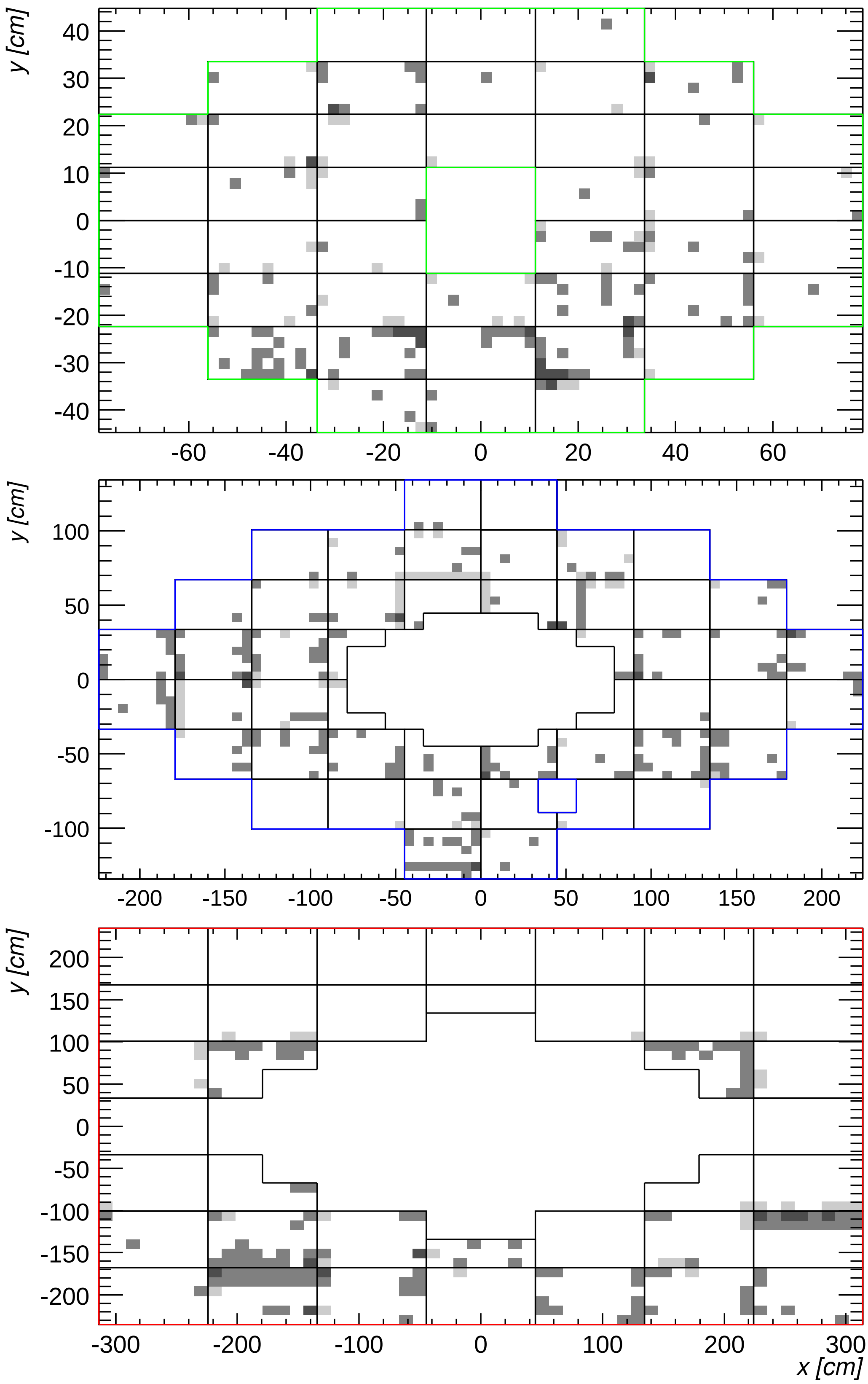


Abbildung 6.4: *Maskierte Kanäle im Pretrigger System (Run 17195). Gezeigt sind die im Pretrigger maskierten Kanäle für das innere, mittlere und äußere Kalorimeter. Ein Kanal kann dabei als zentrale Zelle innerhalb eines Pretrigger Boards (im Histogramm normal gefärbte Zelle), als Randzelle (hell gefärbte Zelle) oder als zentrale und als Randzelle (dunkel gefärbte Zellen) maskiert sein (vgl. Abschn. 4.4.6).*

Energiekodierung	
Kompressionsart	Quadratwurzelkodierung
Innerer ECAL	0 .. 280 GeV
Mittlerer ECAL	0 .. 100 GeV
Äußerer ECAL	0 .. 65 GeV
Kalibrationstabellen (Haupt/Neben-Nummer)	
ECHS	12607/0
ECPD	17189/1
ECSN	15707/0
ECHT	17054/0
Clusterformat	Kreuz
Lookuptable Version	V-00-11
Trigger Schnitte	
Einzelzellen	$E_T \geq 0{,}5$ GeV
Cluster	$E_T \geq 1{,}0$ GeV
Hartes Photon	$E_T \geq 1000$ GeV

Tabelle 6.3: *Pretrigger Einstellungen für den Run 17195. Angegeben sind neben den Triggerschnitten die Energiebereiche der einzelnen Kalorimeterbereiche, die Kalibrationstabellen zur Energiekalibrierung sowie die Lookuptableversion (vgl. Abschn. 4.2.3). Der extrem hohe Schnittwert von 1000 GeV für das Flag zur Erkennung von harten Photonen wurde gewählt, um dieses Flag für den First Level Trigger dauerhaft auszuschalten. Es hat für diese Untersuchungen keine weitere Bedeutung. Für die Einstellungen des restlichen Trigger Systems siehe Abschn. 6.1 und Tabelle 6.1.*

Als Eingangsdaten für die Pretriggersimulation fungierten wie in Abschnitt 4.4.4 beschrieben (analog zur Hardware) die ADC-Werte der einzelnen Kanäle.

6.2.1 Übereinstimmungsklassen

Da es sich, wie oben bereits diskutiert, bei der Simulation EcalSIM um eine hardwarenahe Simulation handelt, sollte sie prinzipiell in der Lage sein, die exakte Nachricht des Pretriggers Bit für Bit zu reproduzieren. Um den Grad der Übereinstimmung zu bestimmen, wurde deshalb ein Vergleich der Pretrigger Cluster vorgenommen. Ein Pretrigger Cluster wird jeweils durch seine Schwerpunktskoordinaten x_{COG} und y_{COG} sowie die Clusterenergie E_{TOT} charakterisiert.

Alle drei Werte sind in der Pretrigger Nachricht als Bitwerte kodiert vorhanden und stehen somit zum Vergleich zur Verfügung. Die horizontale Position x_{COG} ist dabei in 10 Bit in ξ kodiert, die vertikale Position y_{COG} in 9 Bit in η und die Energie in 7 Bit in P. Zusätzlich stehen die beiden Variablen $d\xi$ und $dd\xi$ für den Vergleich zur Verfügung. Für den Vergleich wurden die übereinstimmenden Cluster, je nach Güte der Übereinstimmung, zwei Klassen zugeordnet, die Cluster ohne Übereinstimmung einer dritten. Tabelle 6.4 gibt einen Überblick über die verschiedenen Übereinstimmungsklassen.

	Übereinstimmungskriterien
Exakte Übereinstimmung	$\Delta\xi = 0$, $\Delta\eta = 0$, $\Delta E = 0$, $\Delta dd\xi = 0$ und $\Delta d\xi = 0$
Lockere Übereinstimmung	Gleiche oder Nachbar-Kalorimeterzelle
	Bitfehler in einem Bit in ξ oder η
Keine Übereinstimmung	—

Tabelle 6.4: *Übersicht über die Übereinstimmungskriterien der verschiedenen Übereinstimmungsklassen.*

Exakte Übereinstimmung

Für eine *exakte Übereinstimmung* mussten die Cluster in allen Bitwerten der x- und y-Position sowie der Energie übereinstimmen. Weiterhin wurde gefordert, dass die Cluster auch in den beiden Werten $d\xi$ und $dd\xi$, welche die Extrapolation zur Superlage TC02 charakterisieren, übereinstimmen. Diese beiden Variablen hängen jedoch nur von der Gesamtenergie ab und sollten im Normalfall keine weiteren Einschränkung der Übereinstimmungscluster bedeuten. Da jedoch durch Fehler in der Hardware oder bei der Übertragung der Daten selbst bei exakter Übereinstimmung der restlichen Variablen der Pretrigger Nachricht auch in diesen beiden Werten eine Abweichung auftreten kann, wurden sie ebenfalls in den Test miteinbezogen. Durch den Test dieser beiden Variablen lässt sich eine obere Grenze für die Fehlerrate der Datenübertragung der Pretrigger Nachricht durch das First Level Trigger Netzwerk abschätzen.
Cluster dieser Kategorie bestätigen eine exakte Beschreibung des Pretriggers durch die Simulation angefangen von der Kalibration bis hin zu den Triggeralgorithmen in den entsprechenden Regionen.

Lockere Übereinstimmung

Existieren kleine Abweichungen zwischen der Simulation und der Hardware, so kann es dazu kommen, dass der Cluster zwar sowohl in der Hardware als in auch der Simulation gefunden wird, die Clusterpositionen und insbesondere die Gesamtenergie des Clusters sich jedoch unterscheidet.
Je nach Art und Größe der Fehlbeschreibung wirkt sich die Abweichung hauptsächlich auf die Gesamtclusterenergie aus: Eine geringfügig unterschiedliche Energiekalibration und somit geringfügig unterschiedliche Energiewerte sollte sich nur geringfügig auf die Gesamtenergie des Clusters auswirken und die Position des Clusters weitgehend unberührt lassen. Eine mit einer Änderung der Gesamtenergie einhergehende Änderung der Energieverteilung des Clusters kann jedoch auch zu einer Verschiebung des Clusterschwerpunktes und somit zu Abweichungen in den Schwerpunktspositionen x_{COG} und y_{COG} führen. Dagegen kann der Ausfall einer Zelle und der damit verbundene eventuelle Wegfall einer substantiellen Energiemenge die Gesamtenergie des Clusters und auch die Schwerpunktsposition deutlich verschieben. Dies gilt natürlich ebenso für den umgekehrten Fall einer rauschbehafteten Zelle und der damit verbundenen möglichen Addition eines größeren Energiebetrages. Auch Bitfehler bei der Übertragung der Energiewerte zwischen Readout und Pretrigger System sowie innerhalb der beiden Systeme können zu solchen Abweichungen führen.

Im Extremfall kann es durch solche Änderungen der Energieverteilungen sogar zu einer Verschiebung des Clusters um eine gesamte Zelle kommen, sofern die ‘Lokale Maxima Sucheinheit‘ (LMFU) die Nachbarzelle als zentrale Zelle identifiziert. Darüber hinaus muss bei dem Test auf Übereinstimmung darauf geachtet werden, dass die Zuordnung eines durch die Hardware gemessenen Clusters zu einer Kalorimeterzelle durch die gemessene Schwerpunktsposition nicht immer eindeutig ist. Im Gegensatz zur Simulation ist die Information, welche Zelle die auslösende zentrale Zelle war, in der Hardware Nachricht verloren und kann nur über die beiden Schwerpunktspositionsvariablen ξ und η rekonstruiert werden. Da aber die Granularität der ξ und η-Werte nicht exakt der Granularität des Kalorimeters folgt[5], kann es zu Zweideutigkeiten bei der Zuordnung der Zelle kommen.
In einer zweiten Klasse wurden deshalb Cluster akzeptiert, die ihre Schwerpunktsposition in der gleichen Kalorimeterzelle oder in einer unmittelbaren Nachbarzelle hatten. Eine Übereinstimmung in der Energie wurde bei diesen Clustern nicht gefordert. Die Energie steht somit für diese Cluster als unabhängige Größe zusammen mit der Differenz der Schwerpunktspositionen zur weiteren Charakterisierung dieser Cluster zur Verfügung. Darüber hinaus wurden auch Cluster akzeptiert, die entweder in der ξ oder in der η-Variable einen Unterschied in ihren Bitwerten von einem Bit aufwiesen.
Diese Übereinstimmung wird im Folgenden als *lockere Übereinstimmung* bezeichnet. Cluster dieser Art zeigen Bereiche auf, in denen die Simulation die Hardware zwar nicht exakt, aber dennoch näherungsweise korrekt beschreibt. Gründe für die Abweichungen können sowohl in einer ungenauen Beschreibung durch die Simulation (z. B. ungenaue Kalibration) als auch in Fehlfunktionen der Hardware liegen.

Keine Übereinstimmung

Einer dritten Klasse, *keine Übereinstimmung*, wurden schließlich diejenigen Cluster zugeordnet, die jeweils nur in der Simulation oder nur in der Hardware gemessen wurden und für die kein entsprechend passender Cluster gefunden wurde. Cluster dieser Kategorie können durch eine von der Realität stärker abweichende Beschreibung durch die Simulation oder durch Fehler in der Hardware erklärt werden, die z. B. dazu führen dass die Energie eines Clusters die Triggerschwelle überschreitet bzw. unterschreitet.

6.3 Beschreibungseffizienzen

Cluster, die nur in der Simulation gefunden wurden, deuten auf andere Fehlbeschreibungen als die nur in der Hardware gefundenen Cluster. Daher fand ein Vergleich der Cluster in beide Richtungen statt. Die Beschreibungseffizienzen werden deshalb separat für den Vergleich unter Verwendung der Hardwarecluster als Referenzcluster und für den Vergleich unter Verwendung der Simulationscluster als Referenzcluster angegeben. Tabelle 6.5 gibt einen Überblick über die Beschreibungseffzienzen für die verschiedenen Klassen, Abbildung 6.5 einen Eindruck über die Verteilung der Beschreibungseffizienz

[5] Die Track Finding Units des First Level Triggers in der Superlage TC02 bekommen sowohl die Nachrichten der Myonspuren aus der Superlage MU1 als auch die Daten der Elektronspuren vom Kalorimeter. Da sie in einigen ihrer Lookuptables nicht in der Lage sind zwischen diesen beiden Spurarten zu unterscheiden, musste für diese beiden Spurlagen trotz unterschiedlicher Granularität eine gemeinsame, einheitliche Schwerpunktsposition-Kodierung gewählt werden (vgl. auch Abschn. 4.3.6).

für den Fall der gemessenen Hardwarecluster als Referenzcluster. Tabelle 6.6 gibt einen Überblick über die Beschreibungseffizienzen, Abbildung 6.6 einen Eindruck über die Verteilung der Effizienz für den Fall der simulierten Cluster als Referenzcluster. Es ergibt sich eine gemittelte Beschreibungseffizienz der Simulation von (98,36 ± 0,32) %.

Hardware-Cluster als Referenz				
	Kalorimeter			
	Inneres	Mittleres	Äußeres	Total
Gesamtzahl Cluster	93664	66703	25746	186113
Cluster mit Übereinstimmung				
Gesamt (%)	99,23 ± 0,33	98,52 ± 0,38	97,99 ± 0,62	98,80 ± 0,23
Exakte Übereinstimmung (%)	96,76 ± 0,32	95,42 ± 0,38	93,86 ± 0,60	95,88 ± 0,23
Lockere Übereinstimmung (%)	2,47 ± 0,05	3,10 ± 0,07	4,13 ± 0,13	2,92 ± 0,04
Cluster ohne Übereinstimmung				
Gesamtzahl	722	990	518	2230
Prozentualer Anteil	0,77 ± 0,03	1,48 ± 0,05	2,01 ± 0,09	1,20 ± 0,03

Tabelle 6.5: *Beschreibungseffizienzen zwischen Hardware Pretrigger Clustern und simulierten Clustern (Run 17195). Die Hardwarecluster wurden als Referenzcluster zugrunde gelegt.*

Simulationscluster als Referenz				
	Kalorimeter			
	Inneres	Mittleres	Äußeres	Total
Gesamtzahl Cluster	94601	66859	26318	187778
Cluster mit Übereinstimmung				
Gesamt (%)	98,25 ± 0,32	98,29 ± 0,38	95,86 ± 0,60	97,93 ± 0,23
Exakte Übereinstimmung (%)	95,80 ± 0,32	95,20 ± 0,38	91,82 ± 0,59	95,03 ± 0,22
Lockere Übereinstimmung (%)	2,45 ± 0,05	3,09 ± 0,07	4,04 ± 0,12	2,90 ± 0,04
Cluster ohne Übereinstimmung				
Gesamtzahl	1659	1146	1090	3895
Prozentualer Anteil	1,75 ± 0,04	1,71 ± 0,05	4,14 ± 0,13	2,07 ± 0,03

Tabelle 6.6: *Beschreibungseffizienzen zwischen Hardware Pretrigger Clustern und simulierten Clustern (Run 17195). Die simulierten Cluster wurden als Referenzcluster zugrunde gelegt.*

Für die Gruppe der Cluster ohne Übereinstimmung sei erwähnt, dass keine Ereignisse auftraten, in denen sowohl simulierte Cluster auftraten, die keine Übereinstimmung mit online gemessenen Clustern besaßen, als auch gleichzeitig online gemessene Cluster, die keine Übereinstimmung mit simulierten Clustern besaßen.

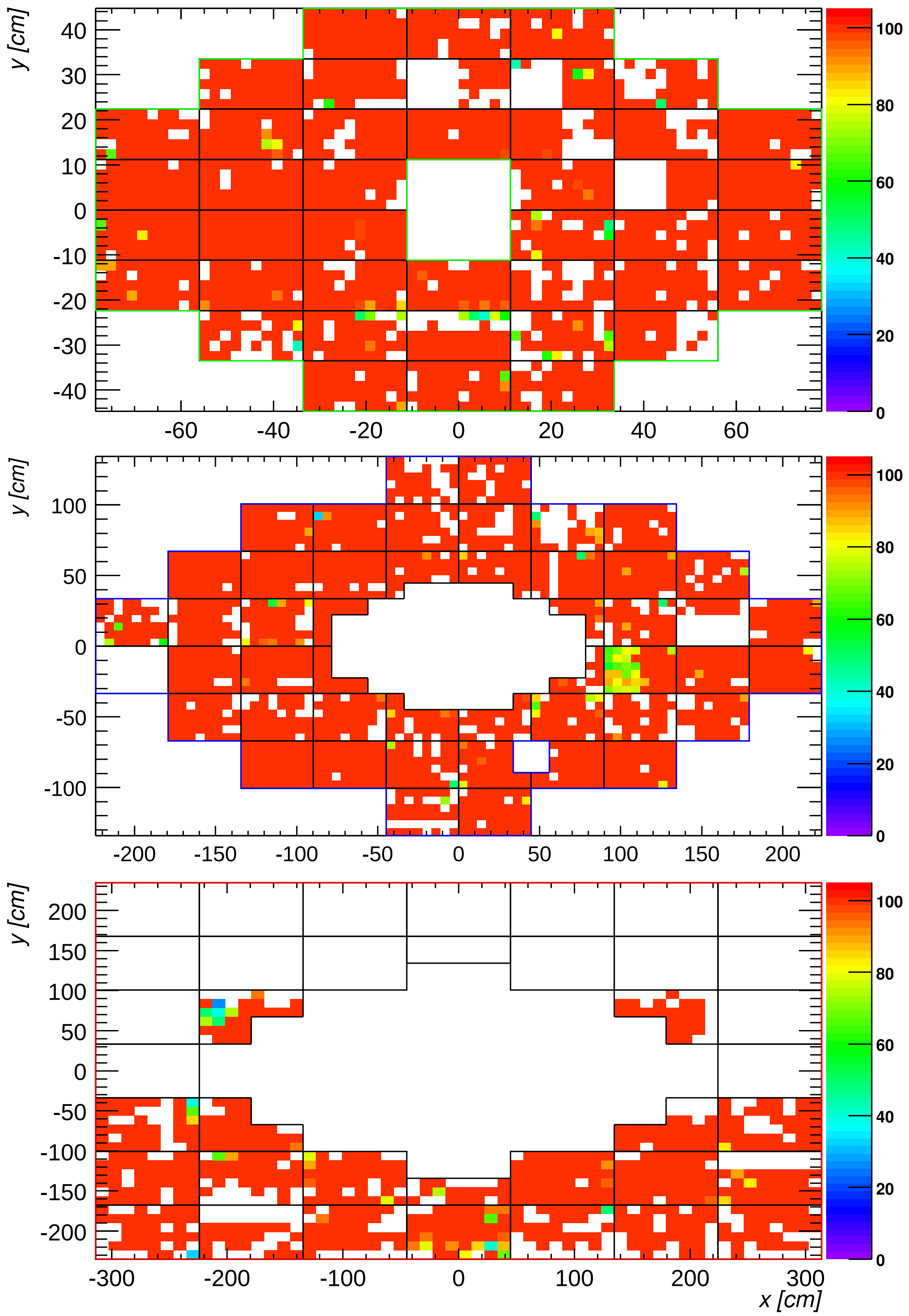


Abbildung 6.5: *Beschreibungseffizienzen bezogen auf die Hardware-Cluster als Referenzcluster für den Run 17195: Dargestellt ist die kombinierte Effizienz der beiden Klassen exakte und lockere Übereinstimmung. Man erkennt über weite Teile des Kalorimeters eine hundert prozentige Beschreibungseffizienz. Auffällig sind größere Bereiche, die eine geringere Effizienz aufweisen, wie z. B. der halbe Bereich des Pretrigger Boards 0x81 im mittleren Kalorimeter. Solche Bereiche weisen auf systematische Fehler in der Simulation oder Hardware hin (vgl. Abb. 4.12). Die leeren Zellen weisen auf maskierte bzw. nicht installierte Kanäle hin.*

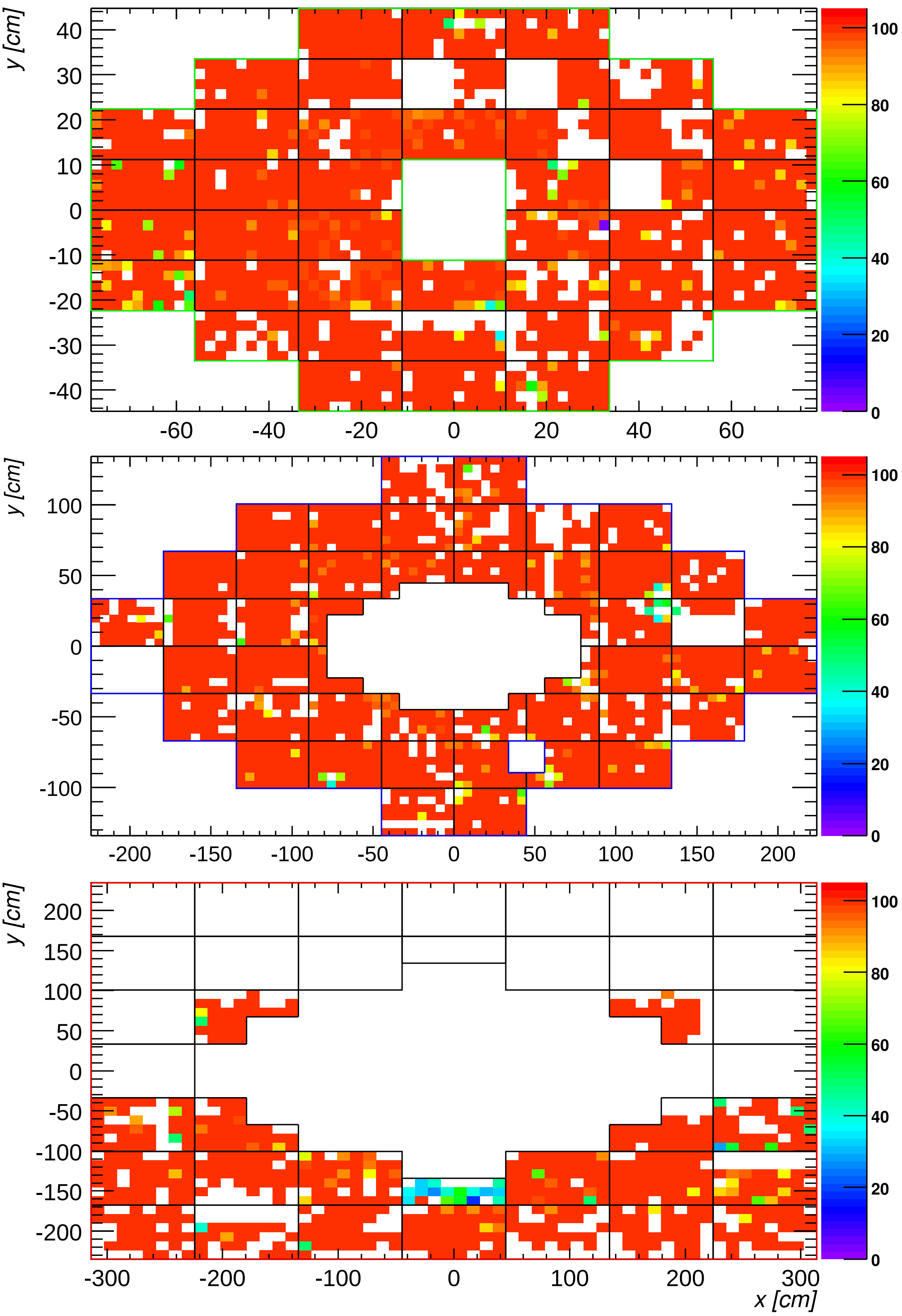


***Abbildung 6.6:** Beschreibungseffizienzen bezogen auf die Simulationscluster als Referenzcluster für den Run 17195: Gezeigt ist die kombinierte Effizienz der beiden Klassen exakte und lockere Übereinstimmung. Man erkennt über weite Teile des Kalorimeters eine hundert prozentige Beschreibungseffizienz. Auffällig sind größere Bereiche, die eine geringere Effizienz aufweisen, wie z. B. der Bereich des Pretrigger Boards 0xBE im äußeren Kalorimeter. Solche Bereiche weisen auf systematische Fehler in der Simulation oder Hardware hin (vgl. Abb. 4.12) Die leeren Zellen weisen auf maskierte bzw. nicht installierte Kanäle hin.*

6.4 Cluster mit lockerer Übereinstimmung

Wie in Abschnitt 6.2.1 bereits diskutiert, kann eine Vielzahl von Gründen dazu führen, dass die in der Simulation gefundenen Cluster nicht hundertprozentig mit den in den Hardware gemessenen Clustern übereinstimmen. Um die Unterschiede zu verstehen, wurden die Abweichungen der Cluster bezüglich Ihrer Energie und ihrer Schwerpunktskoordinaten näher untersucht. Generell ist eine genaue Abschätzung der einzelnen Faktoren insofern schwierig, da verschiedenste Fehlbeschreibungen oder Fehlfunktionen zum gleichen Resultat – z. B. einer Abweichung der Cluster in der Energie – führen.
Betrachtet man die Verteilung der Schwerpunktspositionen der Cluster mit lockerer Übereinstimmung im Kalorimeter (Abbildung 6.8), so sind die Schwerpunkte praktisch über das gesamte Kalorimeter gleichverteilt. Auf eine systematische Fehlfunktion eines Boards oder eine systematische Fehlbeschreibung kann daher nicht geschlossen werden.
Im Folgenden sollen verschiedene Fehlermöglichkeiten diskutiert werden. Abbildung 6.7 gibt einen Überblick über die Orte der möglicher Fehler.

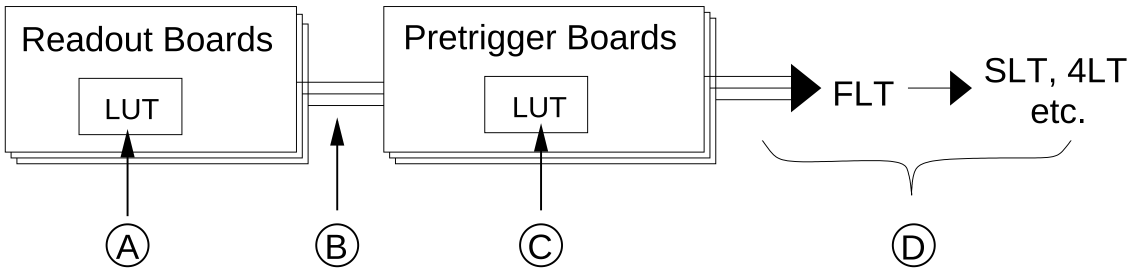


Abbildung 6.7: *Orte möglicher Hardwarefehler: (A) Unterschiede in der Energiekalibration in den Readout Lookuptables, (B) Bitfehler bei der Übertragung der Informationen vom Readout zum Pretrigger Board, (C) Bitfehler bei den Berechnungen in den Lookuptables des Pretrigger Boards und (D) Übertragungsfehler außerhalb des Pretriggers. (vgl. auch Abbildung 6.1).*

6.4.1 Bitfehler in der Übertragung der Pretrigger Nachricht

Zunächst soll eine obere Abschätzung der möglichen Einflüsse externer, nicht vom Pretrigger System selbst zu verantwortender Quellen, erfolgen. Zur Aufzeichnung der online gemessenen Pretrigger Cluster wurden die Pretrigger Nachrichten durch den First Level Trigger hindurch an den Second Level Trigger geleitet, bevor sie auf Band aufgezeichnet wurden. Während dieser Übertragung kann es z. B. durch Bitfehler bei der Übertragung zu einer Verfälschung der ursprünglich korrekten Nachricht kommen (Abb. 6.7 (D)).
Da die in der Pretrigger Nachricht enthaltenen Größen $d\xi$ und $dd\xi$ nur von der totalen Clusterenergie E_{TOT} des Clusters abhängen, stellen sie redundante Informationen dar, die zur Überprüfung der Datenübertragung verwendet werden können. Zeigen zwei Cluster in allen drei Variablen ξ, η sowie E eine exakte Übereinstimmung, so sollten sie bei korrekter Datenübertragung auch in $d\xi$ sowie $dd\xi$ eine exakte Übereinstimmung zeigen. Abbildung 6.9 zeigt die Korrelation der beiden Werte zwischen Simulation und online genommenen Daten für diese Art der Cluster. Man erkennt, dass nur ein einziger Cluster eine Abweichung in $d\xi$ aufweist. Damit lässt sich eine obere Grenze für die Bitfehlerrate R_{BIT} von $3,4 \cdot 10^{-7}$ abschätzen. Dies ist als Abschätzung in guter Übereinstimmung mit einer im First Level Trigger durchgeführten Studie, die eine Bitfehlerrate von weniger als

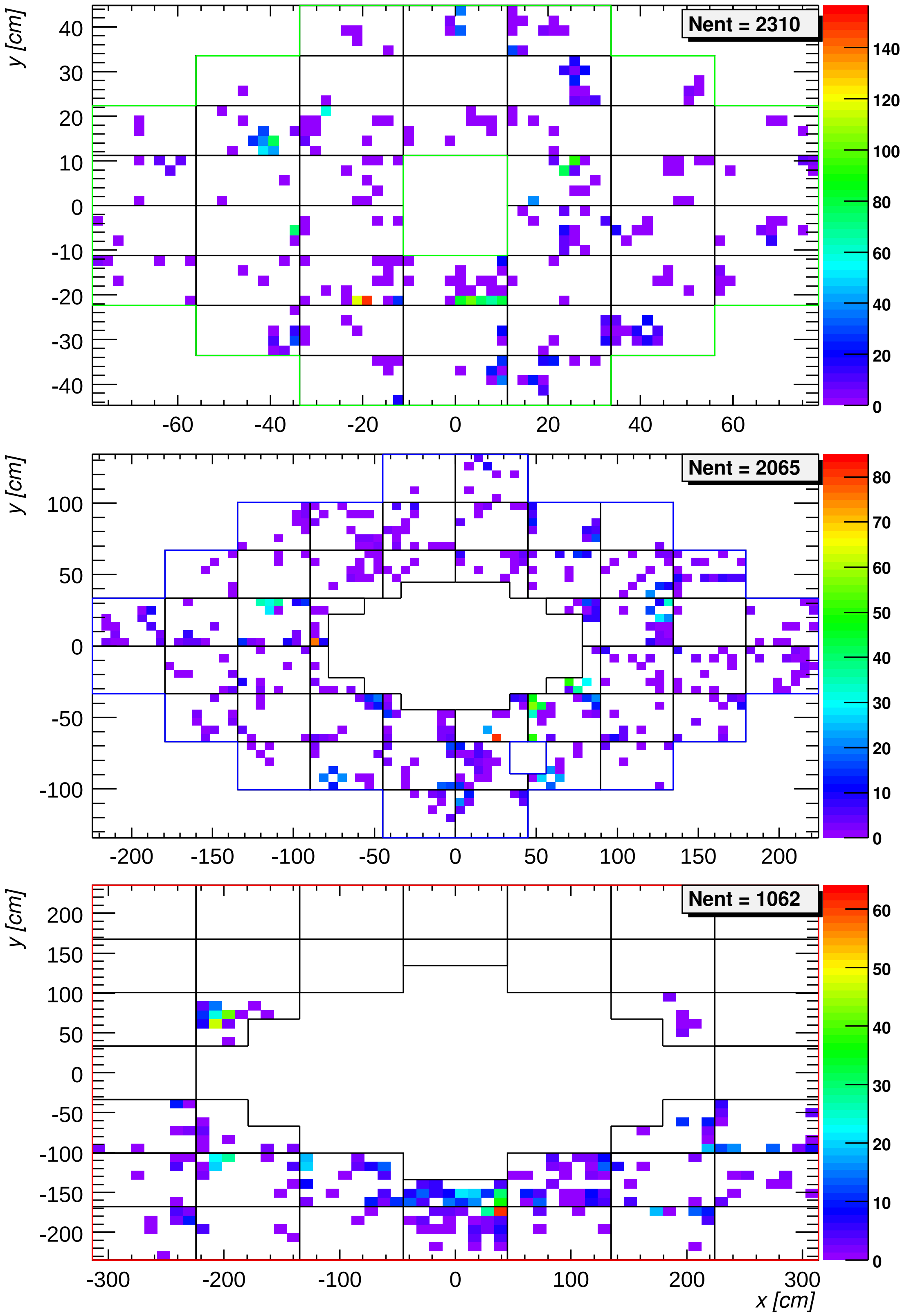


Abbildung 6.8: *Räumliche Verteilung der Pretrigger Cluster mit lockerer Übereinstimmung für den Run 17195 (simulierte Clusterposition). Man erkennt eine relativ gleichmäßige Verteilung der Cluster über das gesamte Kalorimeter zusammen mit einigen lokalisierten Bereichen am Rand einiger Pretrigger Boards.*

$5 \cdot 10^{-7}$ vorhersagt [HER 00]. Diese Rate beinhaltet jedoch gleichzeitig auch Fehlfunktionen in der Berechnung der Variablen $d\xi$ und $dd\xi$ in den Pretrigger Boards, die nicht auf eine falsche berechnete Energie zurückzuführen sind. Für die weiteren Untersuchungen sind solche externen Einflüsse aufgrund der extrem geringen Rate vernachlässigbar.

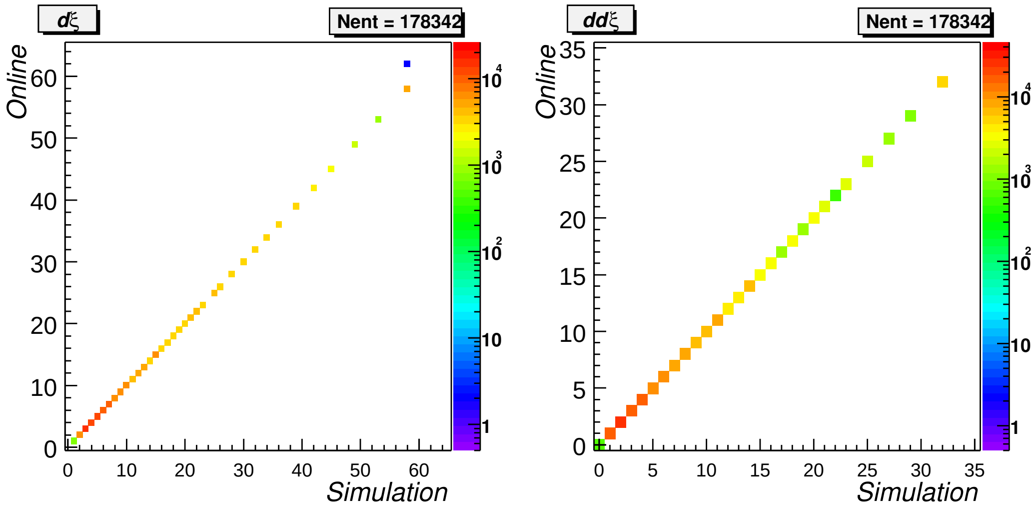


Abbildung 6.9: *Vergleich der Variablen $d\xi$ und $dd\xi$ zur Abschätzung der Bitfehlerrate im FLT. Dargestellt ist die Korrelation der Variablen $d\xi$ und $dd\xi$ für Cluster die eine exakte Übereinstimmung in der Energie und der Schwerpunktsposition besitzen.*

6.4.2 Pretrigger Nachrichten mit Bitfehler in η

Als nächstes erfolgte eine Untersuchung der Cluster, die sich lediglich jeweils in einem Bit in ξ oder in η zwischen den mit der Simulation bestimmten und den online gemessenen Clustern unterschieden. Bitfehler dieser Art traten lediglich für die Variable η, nicht jedoch für die Variable ξ auf. Abbildung 6.10 zeigt den Unterschied der beiden Bitwertverteilungen sowie die Position der Cluster im Kalorimeter. Man erkennt, dass nahezu alle Cluster in dem Pretrigger Board 0xBE liegen und dass für diese Cluster das Bit 6, das bei diesem Board immer gesetzt sein sollte, in den online aufgezeichneten Daten ausgefallen ist. Dies hat zur Folge, dass Cluster eine Verschiebung in der y-Position um ca. 63 cm nach unten erhalten und somit im Pretrigger Board 0xB7 zu liegen kommen.

Interessant ist die Tatsache, dass dies offensichtlich nicht für alle Cluster dieses Boards gilt. Betrachtet man die Belegungsdichtenverteilung der online gemessenen Clusterschwerpunkte (Abb. 6.2), so erkennt man trotz allem in Bereich des Boards 0xBE liegende Cluster. Wäre dieses Bit für alle Cluster dieses Boards ausgefallen, so müsste sich ein Loch in der Belegungsdichte für dieses Board zeigen. Insgesamt weisen nur 55 % der in diesem Board gefundenen Cluster diesen Bitfehler auf. An der Gesamtzahl der Cluster mit lockerer Übereinstimmung besitzen diese Cluster einen Anteil von knapp 4 %.

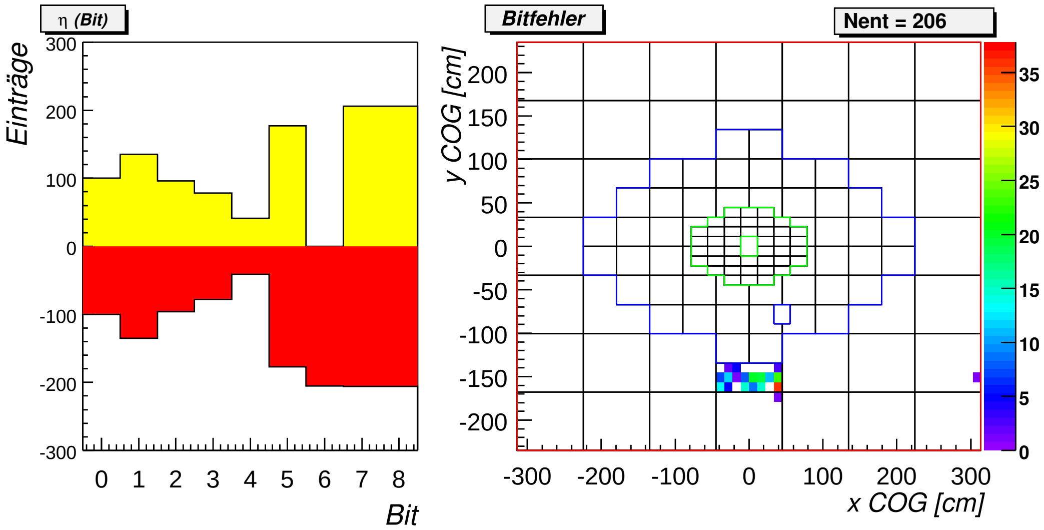


Abbildung 6.10: *Cluster mit Bitfehler in der y-Koordinate. Links ist die Verteilung der η-Bitwerte für diejenigen Cluster abgebildet, die eine lockere Übereinstimmung besitzen und die eine große Differenz in ihrer y-Position ($\delta\eta > 20$) aufweisen. Nach oben ist die in der Hardware gemessene Verteilung, nach unten die simulierte Verteilung dargestellt. Man erkennt, dass Bit 6 komplett ausgefallen ist. Rechts ist die simulierte Position im Kalorimeter abgebildet. Die Cluster liegen bis auf eine Ausnahme komplett im Pretrigger Board 0xBE.*

6.4.3 Cluster mit Unterschieden in der Energiekalibration und Bitfehlern

Abbildung 6.11 zeigt den Vergleich der Bitwerte für die Positionen x_{COG} und y_{COG} (Bitwerte ξ und η) sowie für die Bitwerte der Energie E für die Cluster mit lockerer Übereinstimmung. Abbildung 6.12 zeigt durch Auftragung der Korrelationen der unkodierten Werte, wie sich dies auf die wahren Werte der Positionen (in cm) und der Energie (in GeV) überträgt. Bei den Positionen erkennt man trotz der lockeren Übereinstimmung eine sehr gute Korrelation – die Unterschiede liegen im Bereich weniger Bits bzw. weniger cm. In y-Richtung ist darüber hinaus ein zweites diagonales Band zu erkennen, welches durch die in Abschnitt 6.4.2 diskutierten Bitfehler hervorgerufen wird.
Betrachtet man jedoch die Übereinstimmung bei den Energiewerten, so erkennt man zweierlei: Wie bei dem Vergleich der Positionen besitzt ein großer Teil der Cluster einen geringen Energieunterschied im Bereich weniger Bits bzw. weniger GeV. Daneben existiert aber auch eine größere Zahl an Clustern die einen deutlich größeren Energieunterschied aufweisen. Dabei ist die in der Hardware aufgezeichnete Energie für diese Cluster stets größer als die mittels der Simulation ermittelte. Um zu untersuchen, wodurch und inwieweit sich diese Abweichungen erklären lassen, wurden verschiedene Tests mit der Simulation durchgeführt, die im Folgenden diskutiert werden.

Unterschiede in der Energiekalibration

Kleinere Abweichungen bei der Kalibration der ADC-Werte in bitkodierte Energiewerte zwischen der Simulation und der Hardware können Energiewerte für die einzelnen Zellenergien hervorrufen, die ein Bit größer oder kleiner sind (vgl. Abb. 6.7 (A)). Durch die Aufsummation der Energiewerte in den Lookuptables kann es dann zu einem Unterschied

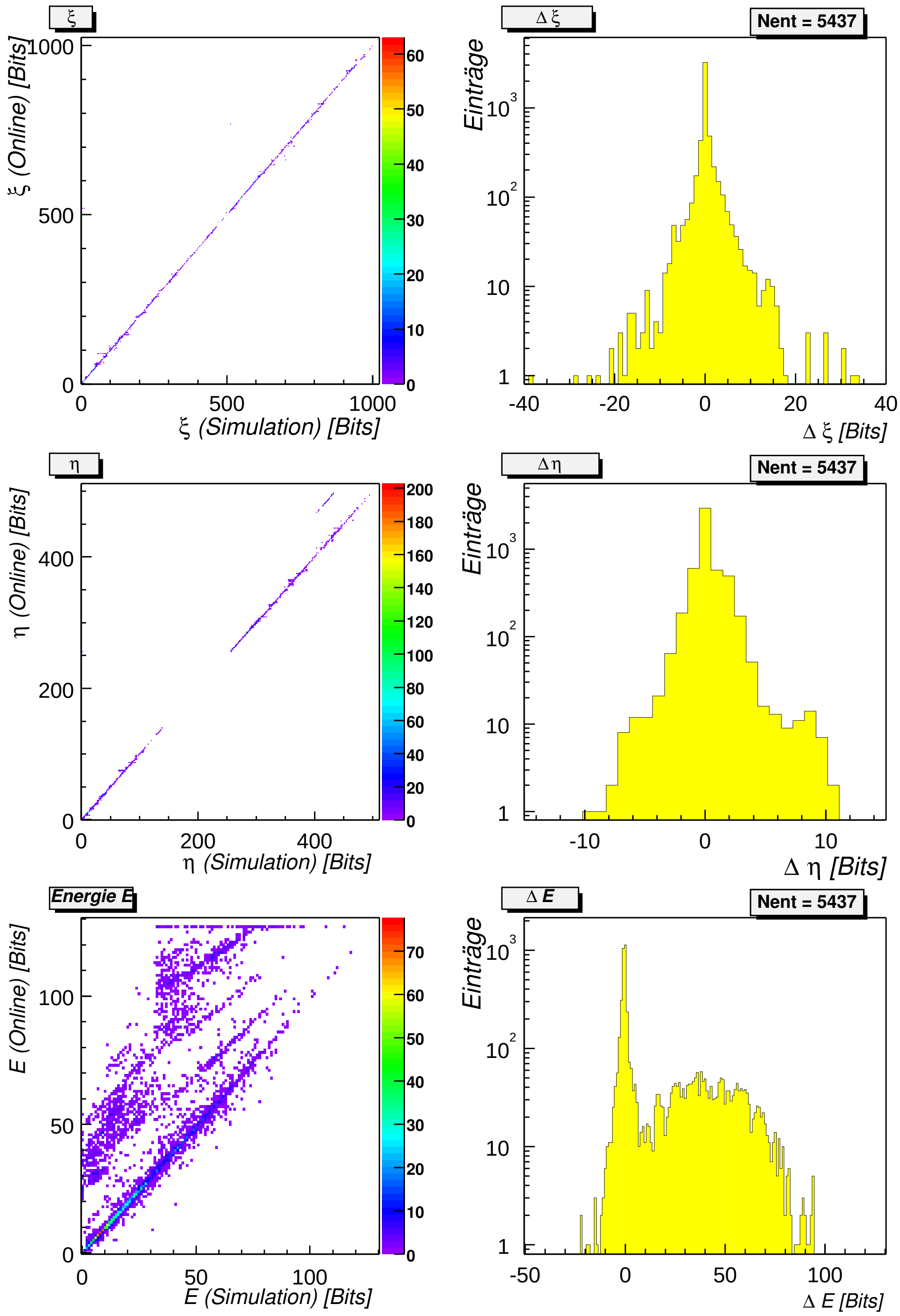


Abbildung 6.11: *Korrelation der Schwerpunktspositionen und der Clusterenergien der Cluster mit lockerer Übereinstimmung. Dargestellt ist die Korrelation der Bitwerte. Man erkennt eine gute Übereinstimmung in den Schwerpunktspositionen. Bei den η Werten ist der Einfluss der diskutierten Cluster mit Bitfehler am oberen Rand des Korrelationsdiagramms als zweites Band ersichtlich. Für das $\Delta\eta$-Diagramm liegen diese Cluster aufgrund des durch den Bitfehler auftretenden hohen Unterschiedes außerhalb des abgebildeten Bereichs (vgl. Abb. 6.10). Die Energieunterschiede lassen sich in zwei Bereiche unterteilen: Die Hälfte der Energieunterschiede fällt in den Bereich ± 5 Bits, die andere Hälfte in den Bereich größerer Energieabweichungen. Für Erklärungsmodelle der verschiedenen Abweichungen siehe Text. Man beachte die logarithmische Skala der Differenzdiagramme.*

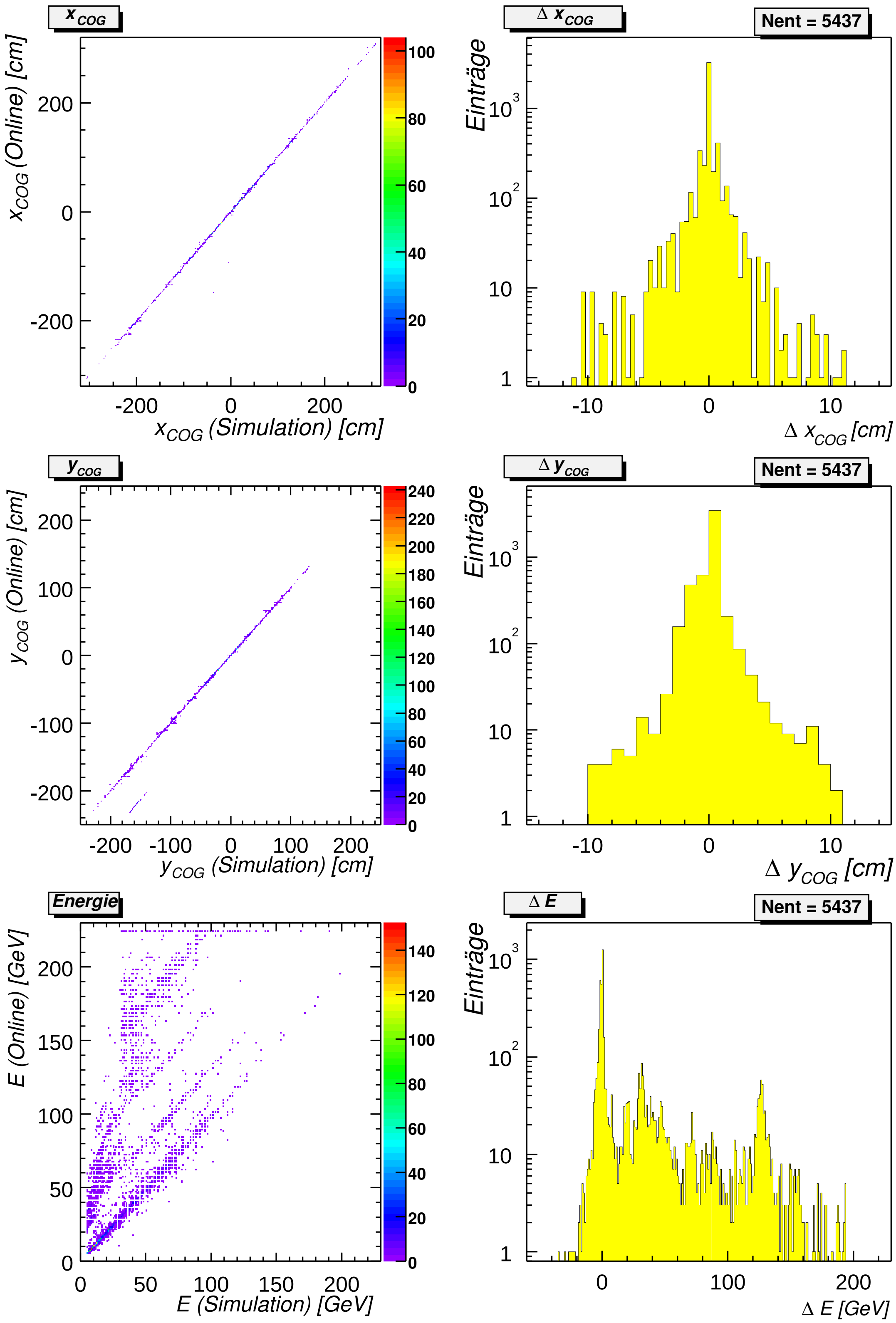


Abbildung 6.12: *Korrelation der Schwerpunktspositionen und der Clusterenergien der Cluster mit lockerer Übereinstimmung. Dargestellt sind die Fließkommawerte. Man erkennt eine gute Übereinstimmung in den Schwerpunktspositionen. Die Energieunterschiede lassen sich in zwei Bereiche unterteilen: Die Hälfte der Energieunterschiede fällt in den Bereich* ± 5 GeV, *die andere Hälfte in den Bereich größerer Energieabweichungen. Für Erklärungsmodelle der verschiedenen Abweichungen siehe Text. Man beachte die logarithmische Skala der Differenzdiagramme.*

in den Clusterenergiewerten von einigen Bits kommen.
Um den Prozentsatz abzuschätzen, für den eine falsche Energiekalibration als Erklärungsmodell in Frage kommt, wurden für die Cluster mit lockerer Übereinstimmung die Zellenergien der einzelnen beteiligten Zellen künstlich um ein Bit erhöht oder erniedrigt und getestet, in wieweit dadurch eine exakte Übereinstimmung der Pretrigger Nachrichten in allen drei Variablen, ξ, η und E erreicht werden kann. Aufgrund des geringen Prozentsatzes an Clustern mit lockerer Übereinstimmung im Vergleich zu Clustern mit exakter Übereinstimmung wurde maximal von einem Rundungsfehler pro Cluster ausgegangen.
Abbildung 6.13 zeigt die Korrelationen der Clusterenergiewerte, für die so eine künstliche Übereinstimmung erreicht werden konnte. Man erkennt, dass sich, wie erwartet, auf diese Weise weitgehend nur kleine Energieunterschiede erklären lassen – im Bereich großer Energieunterschiede finden sich keine Cluster. An der Gesamtzahl der Cluster mit lockerer Übereinstimmung besitzen diese Cluster etwa einen Anteil von 6 %.

Bitfehler bei der Übertragung der Energiewerte zum Pretrigger System

Energieunterschiede von mehr als fünf Bit lassen sich z. B. durch Bitfehler in der Übertragung der Energiewerte vom Readout zum Pretrigger System erklären (Abbildung 6.7 (B)). Durch die fehlerhafte Übertragung eines Bits kann je nach Bit der übertragene Energiewert deutlich höher oder niedriger ausfallen als der Originalwert.
Wie im Falle der Rundungsfehler wurde auch hier zur Untersuchung der Erklärungsmöglichkeit der Energieunterschiede der Cluster mit lockerer Übereinstimmung künstliche Bitfehler in der Simulation bei der Übertragung der Energiewerte vom Readout in das Pretrigger System überlagert. Mit Hilfe dieser künstlichen Bitfehler wurde untersucht, inwieweit so eine exakte Übereinstimmung der Pretrigger Nachrichten in allen drei Variablen ξ, η und E erreichbar ist. Ebenfalls wie bei den Untersuchungen zu den Rundungsfehlern wurde dabei aufgrund der verhältnismäßig geringen Zahl an Clustern von maximal einem Bitfehler pro Cluster ausgegangen.

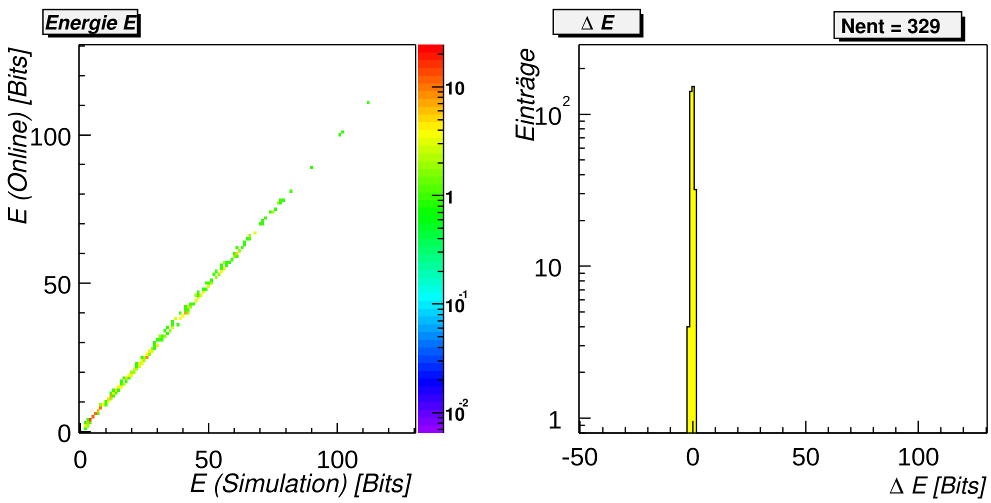


Abbildung 6.13: *Energiedifferenz von Clustern mit möglicher geringfügig unterschiedlicher Energiekalibration. Dargestellt sind die Energiedifferenzen der Cluster, die sich durch einen möglichen Rundungsfehler in der Energiekalibration erklären lassen.*

Abbildung 6.14 zeigt die Korrelationen der Cluster, für die auf diese Weise eine künstliche Übereinstimmung erreicht werden konnte. Man erkennt, dass wiederum der Großteil der Cluster, die so erklärt werden können, einen kleinen Energieunterschied besitzen, zusätzlich können jedoch auch einige Cluster mit einem größerem Energieunterschied durch diese Bitfehler erklärt werden. An der Gesamtzahl an Clustern mit lockerer Übereinstimmung besitzen diese Cluster einen Anteil von 7 %.

Bitfehler innerhalb der Pretrigger Boards

In einem dritten Test wurde schließlich der Einfluss von Bitfehlern in der Energieberechnung innerhalb des Pretrigger Systems in den Lookuptables untersucht (Abbildung 6.7 (C)). Auch Bitfehler in der Übertragung der Energiewerte zwischen den einzelnen Lookuptables können größere Energieunterschiede hervorrufen. Jedoch sollte die Wahrscheinlichkeit für Bitfehler dieser Art wesentlich geringer sein, da sie nicht über längere Kabel oder komplizierte Elektronik übertragen werden.
Abbildung 6.15 zeigt die Korrelation der Clusterenergien für die so eine künstliche Übereinstimmung erreicht werden kann. Wiederum besitzt der Großteil der so erklärbaren Cluster einen relativen geringen Energieunterschied. An der Gesamtzahl an Clustern mit lockerer Übereinstimmung besitzen diese Cluster einen Anteil von 8 %.

Zusammenfassend können alle drei getesteten Fehler bzw. Fehlfunktionen somit nur für einen kleinen Teil der Cluster mit lockerer Übereinstimmung als Erklärungsmodell betrachtet werden. Zusätzlich sind die hier diskutierten Fehlerquellen insofern überlappend, als verschiedene Fehlerquellen zur gleichen Energiedifferenz führen. Mit anderen Worten kann ein Energie- bzw. Positionsunterschied eines Clusters teilweise durch verschiedene Fehlfunktionen gleichzeitig erklärt werden. Der Gesamtanteil, der durch alle drei Fehlfunktionen gemeinsam erklärt werden kann, ist somit auch geringer als die Summe der Einzelanteile und liegt bei etwa 12 %. Die überwiegende Zahl an Clustern kann also durch dieses Erklärungsmodell nicht erklärt werden.

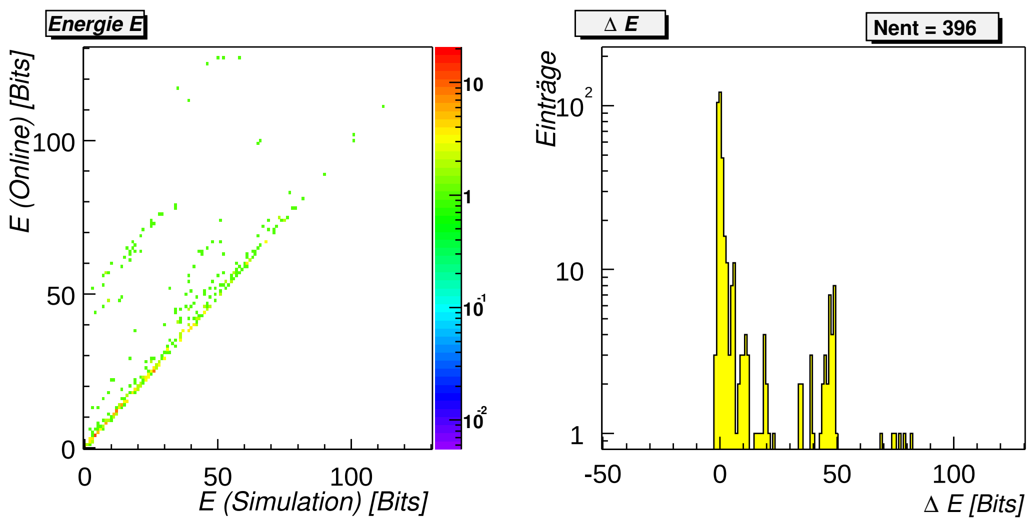


Abbildung 6.14: *Energiedifferenz von Clustern mit möglichen Bitfehlern bei der Übertragung der Energiewerte vom Readout zum Pretrigger System. Dargestellt sind die Energiedifferenzen der Cluster, die sich durch einen solchen Bitfehler erklären lassen.*

6.4.4 Rauschbehaftete und heiße Zellen

Als ein weiteres Erklärungsmodell können rauschbehaftete und heiße Zellen im Readout und Pretrigger Board herangezogen werden. Unter rauschbehafteten Zellen versteht man in diesem Zusammenhang Zellen, die zeitweilig falsche Energiewerte liefern, unter heißen Zellen versteht man Zellen, die dauerhaft eine falsche Energie liefern.
Da im Allgemeinen nur die zentrale Zelle einen größeren Energiewert besitzt, sollte die Wahrscheinlichkeit, dass eine rauschbehaftete oder heiße Zelle einen größeren Energiewert als den wahren liefert, entsprechend größer sein. Dementsprechend sollte die Gesamtenergie der online gemessenen Cluster, die diesen Effekt aufweisen auch höher sein als die (in der Simulation bestimmte) korrekte Energie. Handelt es sich bei der defekten Kalorimeterzelle um die zentrale Zelle des Clusters, so gilt diese Einschränkung sicherlich nicht, jedoch würde eine niedrigere Energie für diese Zelle automatisch zu einem größeren Verlust der Gesamtenergie und damit zur Möglichkeit führen, dass der Cluster nur noch eine Transversalenergie besitzt, die unterhalb der Schwelle liegt und somit dazu, dass der Cluster verworfen wird.
Während der Datennahme wurde der Test der Pretriggerzellen auf rauschbehaftete und heiße Zellen aber ständig verbessert. Betrachtet man z. B. einen Run am Anfang der Datennahmeperiode, so dominieren zu diesem Zeitpunkt die Cluster mit heißen Zellen die Pretrigger Cluster. Bei diesem am Ende der Datennahme liegenden Run fand eine weitgehende Maskierung dieser defekten Zellen statt (vgl. Tabelle 6.2). Da jedoch der Test der einzelnen Kalorimeterzellen nur mittels eines sehr beschränkten Datensatzes durchgeführt wurde und zudem keine Langzeituntersuchungen gemacht wurden, ist anzunehmen, dass nicht alle defekten Zellen auf diese Art erfasst worden sind.
Letztendlich Aufschluss darüber kann nur ein systematischer Test geben, wie er inzwischen mit dem, zusammen mit der Simulation im Rahmen dieser Arbeit entwickelten, *Hardwaretest* möglich ist, der die systematische Einspeisung von Clustern in das Kalorimeter und die Auslese der Pretriggerinformation im First Level Trigger erlaubt. Nähere Einzelheiten zu diesem Test finden sich in Kapitel 4.4.9. Der Test wurde bereits auf einem

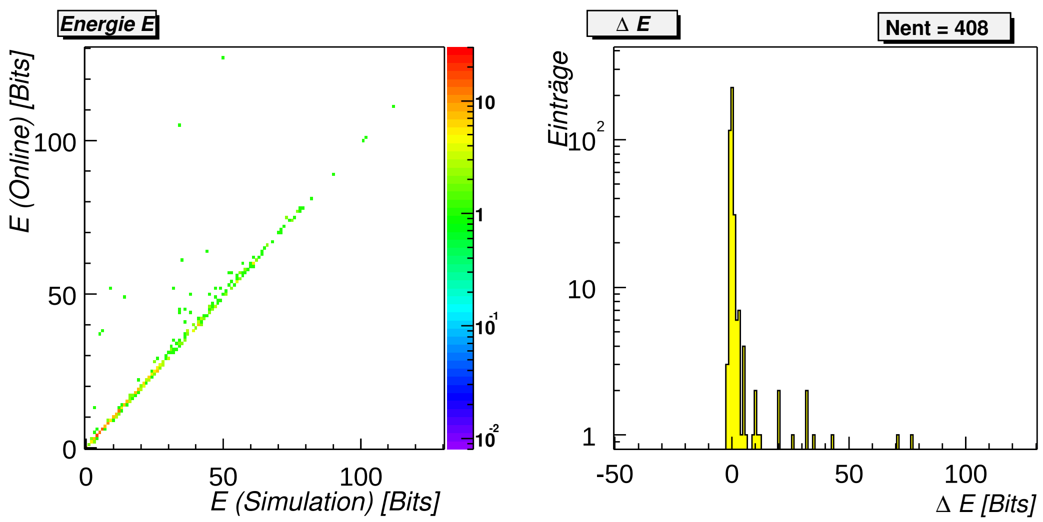


Abbildung 6.15: *Energiedifferenz von Clustern mit möglichen Bitfehlern im Pretrigger Board. Dargestellt sind die Energiedifferenzen der Cluster, die sich durch einen möglichen Bitfehler im Pretrigger Board erklären lassen.*

Teil des Kalorimeters zu Probezwecken erfolgreich eingesetzt – ein umfassender Test des Kalorimeters war jedoch bis jetzt noch nicht möglich, da sich die Pretriggerelektronik aufgrund des Umbaus des HERA-Beschleunigers und der dadurch bedingten längeren Strahlpause im Moment noch in Umbau bzw. Upgrade befindet. Sobald die Elektronik jedoch wieder komplett eingebaut ist, sollte einem umfassenden Test nichts mehr im Wege stehen.
Eine nachträgliche Untersuchung des Einflusses solcher Zellen ist aufgrund der Vielzahl an Möglichkeiten nur bedingt und nur mit einem sehr hohen Aufwand möglich, der den Nutzen bei weitem übersteigen würde. Zudem wird wie erwähnt davon ausgegangen, dass mittels systematischerer Tests, die Anzahl nicht maskierter defekter Zellen weiter reduziert werden kann. Von weiteren Tests wurde deshalb im Rahmen dieser Arbeit abgesehen.

6.5 Cluster ohne Übereinstimmung

Für einige der Cluster konnte jeweils kein passender Cluster in der Simulation bzw. in den online genommenen Daten gefunden werden. Dabei kamen solche Cluster in jedem Ereignis insofern isoliert vor, als nie zusammen der Fall auftrat, dass ein Cluster der online Daten nicht zu einer Übereinstimmung gebracht werden konnte und im gleichen Ereignis ein Cluster der Simulation nicht zur Übereinstimmung gebracht werden konnte. Dies legt die Vermutung nahe, dass die Transversalenergie der zugehörigen Cluster in der Simulation bzw. in der Hardware jeweils unterhalb der Transversalenergieschwelle lag und deshalb das Trigger System nicht ausgelöst wurde. In Abschnitt 6.2.1 wurde gezeigt, dass 1,20 % der Hardware Cluster nicht in der Simulation gefunden werden und 2,07 % der simulierten Cluster nicht in den online Daten.
Der Ausfall einer Zelle im Readout oder im Pretrigger Board kann dazu führen, dass die Transversalenergie eines Cluster in der Hardware unterhalb der Transversalenergieschwelle zu liegen kommt und verworfen wird, in der Simulation jedoch akzeptiert wird. Umgekehrt führen heiße Kanäle in der Hardware dazu, dass Cluster die in der Simulation eine Transversalenergie unterhalb der Schwelle besitzen, in der Hardware eine Transversalenergie oberhalb der Schwelle besitzen und den Trigger auslösen. Das gleiche gilt für Bitfehler in der Übertragung der Energiewerte, die eine zu hohe oder zu niedrige Clusterenergie vortäuschen. Schließlich kann eine nicht korrekt funktionierende Maskierung in der Simulation oder Hardware ebenfalls dazu führen, dass Clusterkandidaten akzeptiert oder verworfen werden.
Abbildung 6.16 zeigt die Verteilung der nur in der Simulation gefundenen Cluster, Abbildung 6.17 die Verteilung der nur in der Hardware gefundenen Cluster im Kalorimeter.

6.5.1 Simulierte Cluster ohne Übereinstimmung

Betrachtet man die räumliche Verteilung der simulierten Cluster ohne Übereinstimmung in Abbildung 6.16, so erkennt man zunächst eine relative Gleichverteilung der Cluster über das gesamte Kalorimeter mit einer gewissen Häufung an Clustern im Bereich des Pretrigger Board 0xBE im äußeren Kalorimeter (vgl. Abbildung 4.12).
Um zu untersuchen, ob die nur in der Simulation gefundenen Cluster wirklich vermehrt Transversalenergiewerte E_T in der Nähe der Schwelle besitzen, fand ein Vergleich des

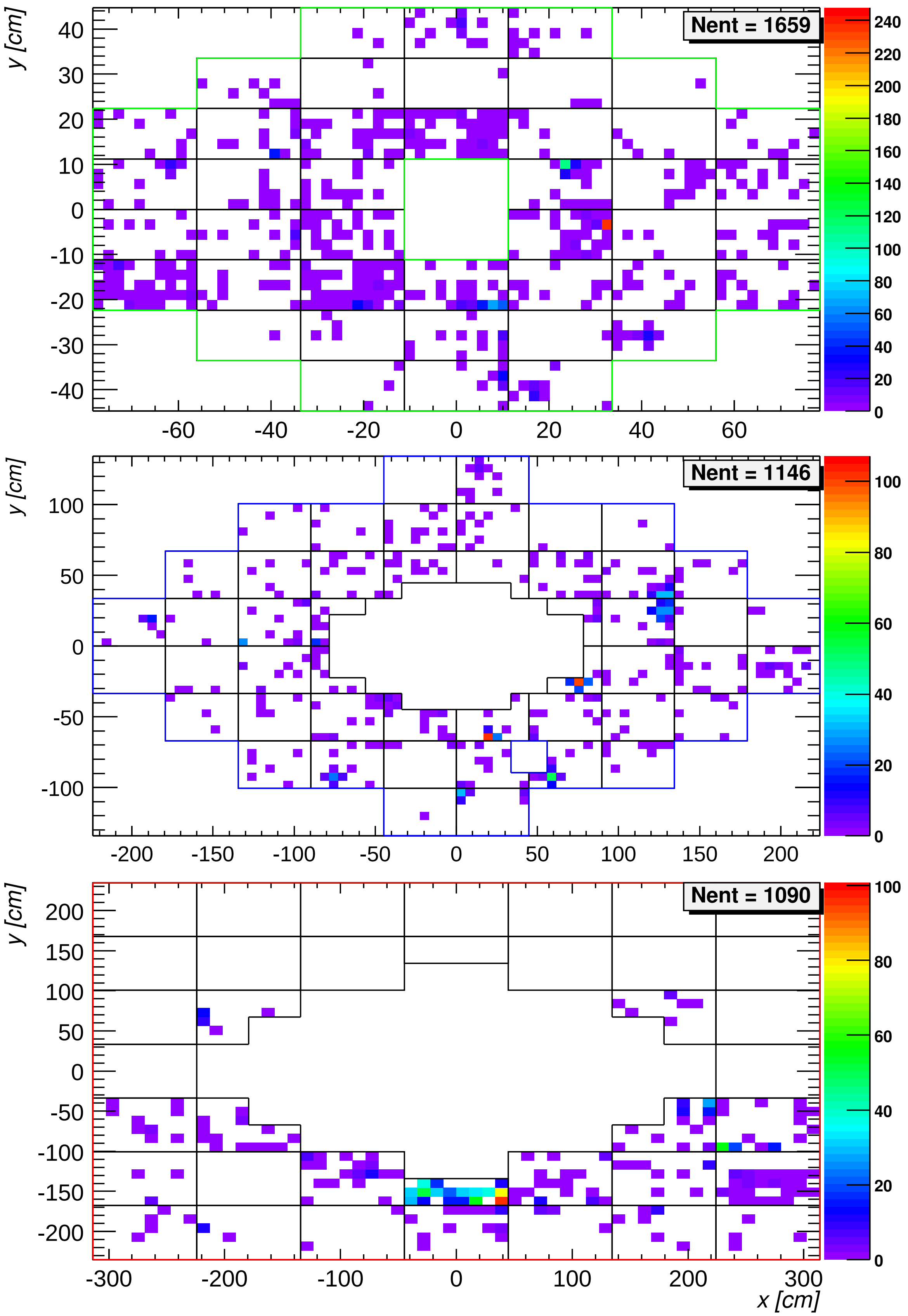


Abbildung 6.16: *Räumliche Verteilung der Simulationscluster ohne Übereinstimmung (Run 17195). Man erkennt eine relativ gleichmäßige Verteilung über das gesamte Kalorimeter mit einigen heißen Punkten. Auffällig ist insbesondere der Bereich des Pretrigger Boards 0xBE im äußeren Kalorimeter (vgl. Abb. 4.12).*

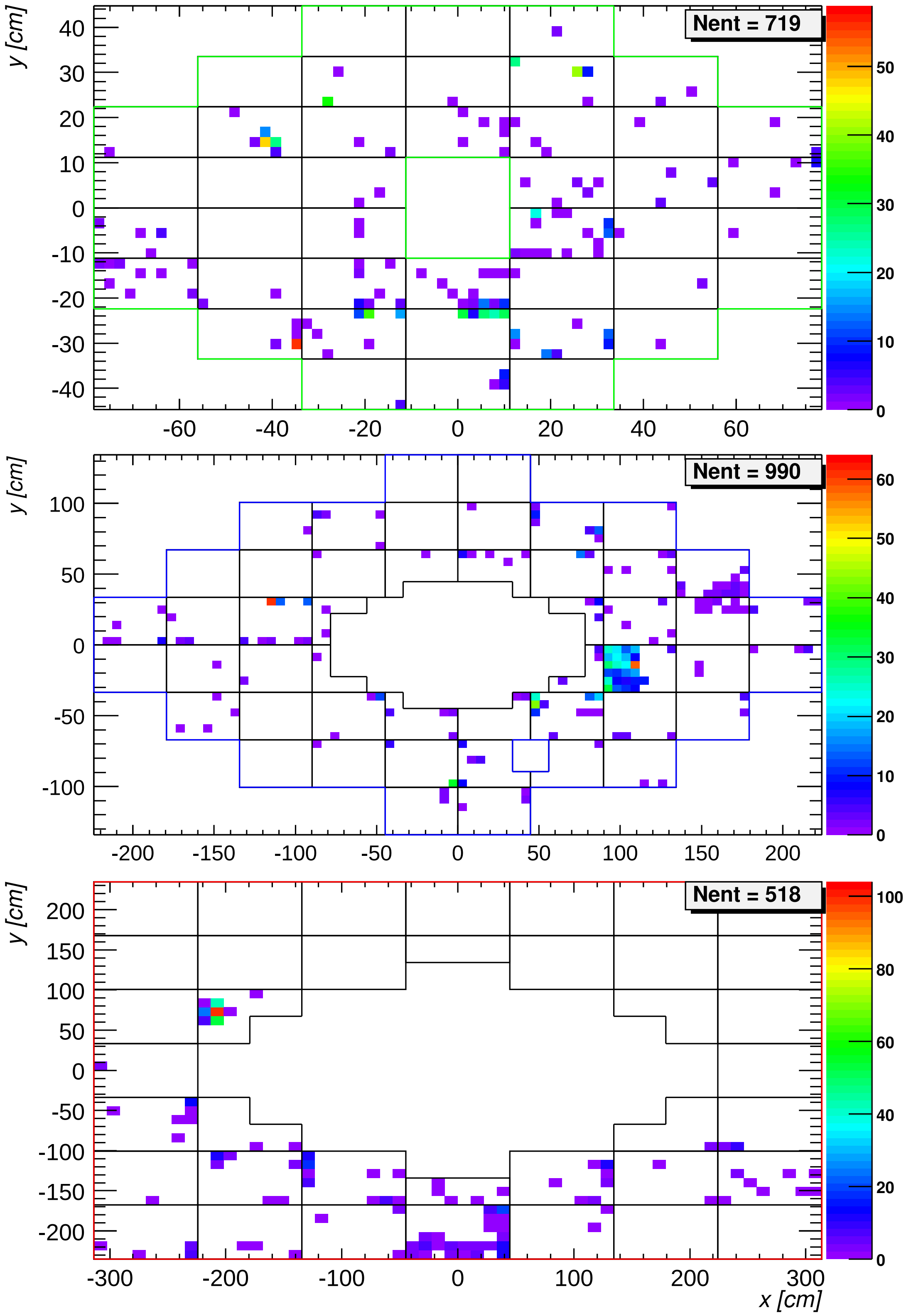


Abbildung 6.17: *Räumliche Verteilung der Hardwarecluster ohne Übereinstimmung (Run 17195). Man erkennt eine weitläufige Verteilung über das Kalorimeter wobei eine größere Zahl der Cluster am Rand der Pretrigger Boards liegt. Darüber hinaus fallen drei Bereiche mit einer relativen Häufung von Clustern auf (vgl. Abb. 4.12): Im inneren Kalorimeter existiert eine Häufung an der Grenze zwischen den Pretrigger Boards 0x1A und 0x26, im äußeren Kalorimeter im Bereich des Pretrigger Boards 0xD4. Besonders fällt jedoch auf, dass es insbesondere im Bereich des Pretrigger Boards 0x81 im mittleren Kalorimeter zu einer Häufung kommt.*

auf die Anzahl der Cluster normierten relativen E_T-Spektrums der simulierten Cluster ohne Übereinstimmung mit dem entsprechenden Spektrum der Cluster mit exakter Übereinstimmung statt (Abbildung 6.18).
Man erkennt, dass das E_T-Spektrum dem Referenzspektrum sehr gut folgt, bei E_T-Werten oberhalb der Schwelle jedoch einen deutlichen Überhang aufweist. Berücksichtigt man zusätzlich, dass die Clusterzahl mit wachsendem E_T-Wert stark abfällt, so läßt sich sagen, dass der größte Teil der Cluster ohne Übereinstimmung nahe der Schwelle liegen, es durchaus aber auch Cluster ohne Übereinstimmung im Bereich höherer E_T-Werte gibt. Der Grund für die Cluster ist damit entweder in einer leicht unterschiedlichen Energiekalibration oder in dem Ausfall von Kanälen in der Hardware, die nicht maskiert wurden, zu suchen. Da von einem Cluster nur die Gesamtenergie in der Pretrigger Nachricht gespeichert ist, ist die Information über die einzelnen am Cluster beteiligten Zellen verloren. Ein Kanal kann sowohl im Readout als auch im Pretrigger Board ausfallen, welches unterschiedliche Auswirkungen auf den Gesamtcluster hat. Zudem kann es sich um ein zeitabhängiges Phänomen handeln. Eine Bestimmung und Maskierung solcher Kanäle ist daher sehr aufwendig. Genauen Aufschluss über solche Kanäle könnte ein spezieller Run bringen, bei dem die Lookuptables so aufgesetzt werden, dass die Energiesummation nur mittels der zentralen Zelle durchgeführt wird. Da die anderen Zellen dann nicht mehr zum Cluster beitragen, wäre damit eine detaillierte Untersuchung aller Zellen möglich.

6.5.2 Hardware Cluster ohne Übereinstimmung

Betrachtet man die räumliche Verteilung der Hardware Cluster ohne Übereinstimmung (Abbildung 6.17), so erkennt man eine weitläufige Verteilung der Cluster über das Kalorimeter, wobei ein Großteil der Cluster am Rand der Pretrigger Boards liegt. Weiterhin sind einige lokale Häufungen, z. B. im Bereich des mittleren Kalorimeters im Board 0x81, zu erkennen (vgl. Abbildung 4.12).
Abbildung 6.18 zeigt wie für die Simulations Cluster ohne Übereinstimmung die relativen E_T-Spektren für die nicht gefundenen Hardware Cluster. In der Verteilung fallen besonders drei Bereiche auf: Neben Clustern deren Transversalenergie, wie im Diagramm der Simulations Cluster, geringfügig oberhalb der Schwelle liegen, und einem Bereich von Clustern deren Transversalenergie weit oberhalb der Triggerschwelle liegen, existiert zusätzlich eine größere Anzahl von Clustern, die zum Teil eine Transversalenergie deutlich unterhalb der Triggerschwelle besitzen und somit vom Pretrigger System hätten verworfen werden müssen. Betrachtet man die Schwerpunktspositionen dieser Cluster (Abb. 6.19), so erkennt man, dass sich praktisch alle Cluster bis auf zwei Ausnahmen im Pretrigger Board 0x81 befinden. Offensichtlich handelt es sich um eine lokalisierte Fehlfunktion dieses Boards. Bei den beiden anderen Clustern handelt es sich möglicherweise um Bitfehler in der Übertragung der Pretrigger Nachricht.
Ein Vergleich der Hardware Pretrigger Nachrichten dieser Cluster von Board 0x81 mit denen der Simulation unter Umgehung des Triggerschnitts in der Simulation zeigte, dass die Pretrigger Nachrichten dieses Boards in der Simulation bezüglich der Energie und der Schwerpunktskoordinaten die gleichen Werte besitzen, in der Simulation jedoch aufgrund ihres Transversalenergiewertes E_T korrekter Weise verworfen werden. Da sich die Transversalenergie der Cluster deutlich unterhalb der Schwelle befindet, kann es sich hierbei nicht um einen Schwelleneffekt handeln. Auch ein geringfügig unterschiedliches Koordinatensystem in der Simulation, das zu einer geringen Verschiebung der Triggerschwelle

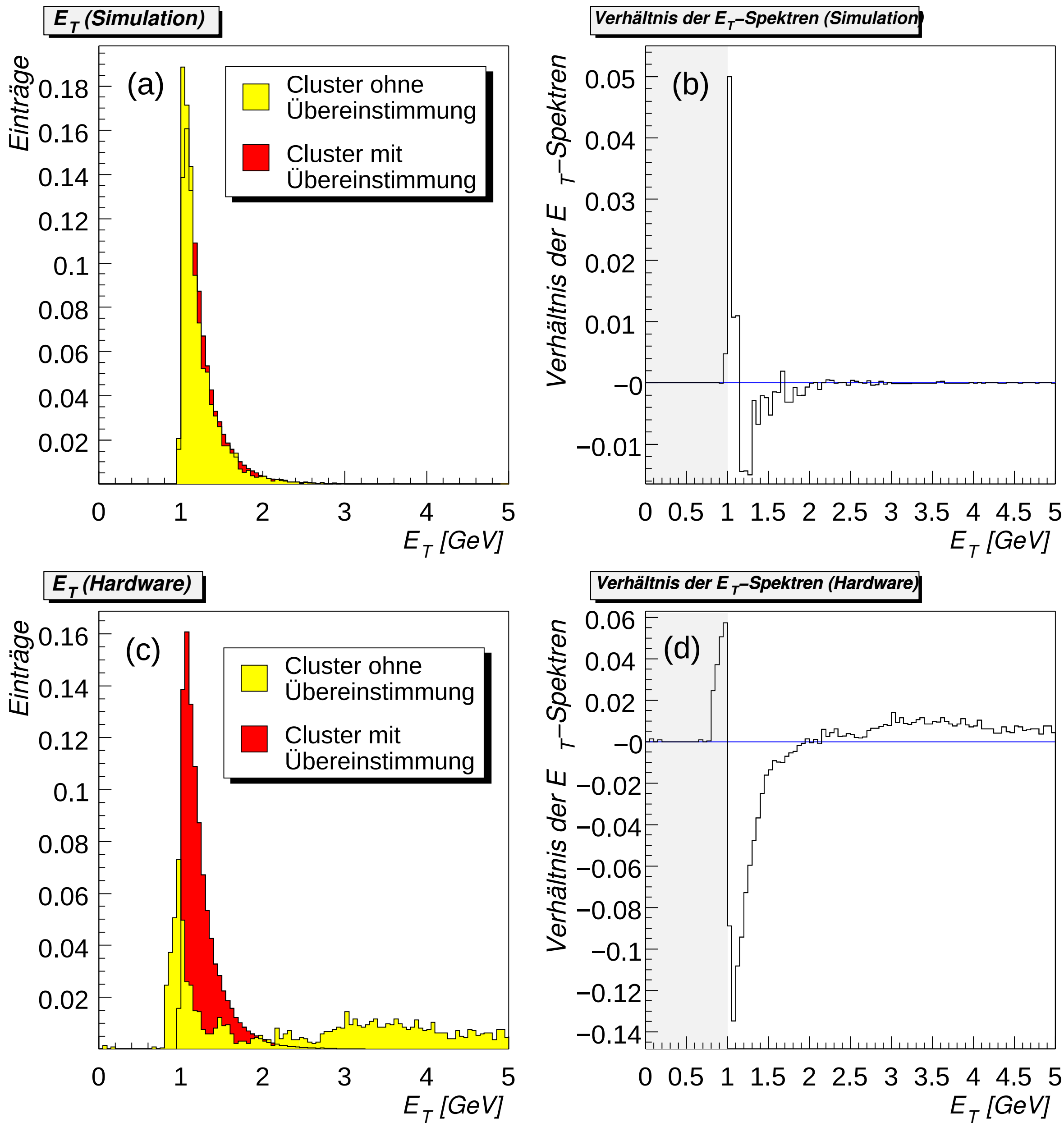


Abbildung 6.18: *Vergleich der Referenz E_T-Spektren von Clustern mit exakter Übereinstimmung mit Clustern ohne Übereinstimmung (jeweils normiert auf die Zahl der Einträge). Die linken Abbildungen stellen jeweils den direkten Vergleich der beiden Spektren dar, die rechten Abbildungen das Verhältnis der beiden E_T-Spektren. Der graue Bereich in der rechten Abbildung kennzeichnet den E_T-Bereich der durch den Triggeralgorithmus hätte verworfen werden müssen. (a) und (b): Vergleich der nur in der Simulation gefundenen Cluster. (c) und (d): Vergleich der nur in der Hardware gefundenen Cluster.*

führen würde[6], kann nicht als Erklärungsmöglichkeit dienen, da die Cluster bei ihrer Energie nur eine Transversalenergie oberhalb der Schwelle besitzen, sofern die Zellposition im Algorithmus des Boards um mindestens eine gesamte Zelle verschoben wäre. Ein

[6]Bei dem Transversalenergieschnitt handelt es sich um einen ortsabhängigen Energieschnitt (vgl. Gleichung 4.2).

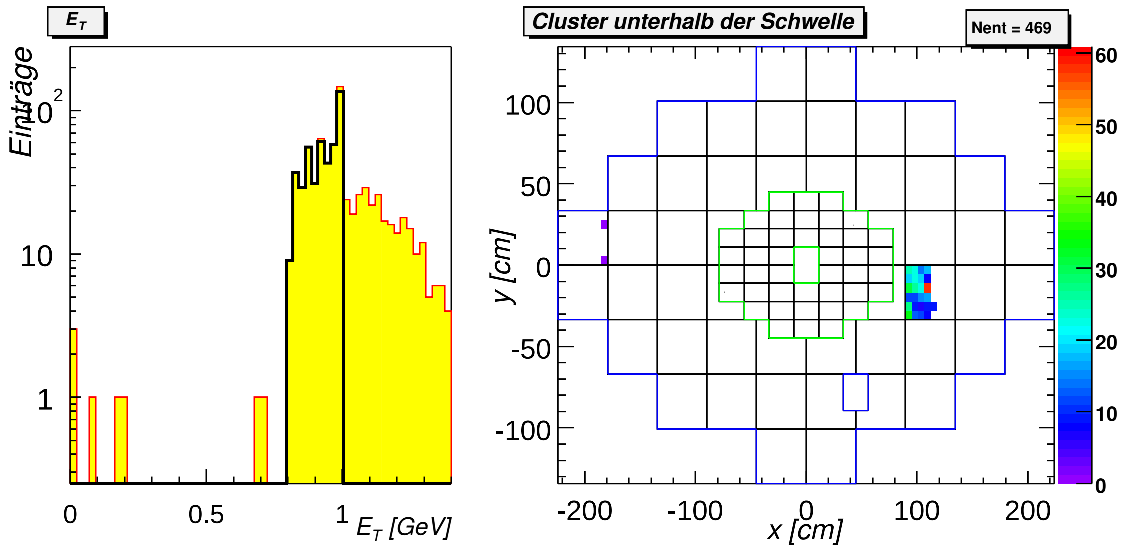


Abbildung 6.19: *Cluster unterhalb der E_T-Schwelle. Im linken Bild ist die Transversalenergieverteilung für die Cluster, die nur in der Hardware gefunden worden sind (gefülltes Diagramm) zusammen mit den nicht gefundenen Clustern des Pretrigger Boards 0x81 dargestellt, im rechten Bild sind die Schwerpunktspositionen der Cluster dargestellt, die unterhalb der Schwelle von 1 GeV liegen und deshalb vom Pretrigger System hätten verworfen werden müssen. Man erkennt deutlich eine Fehlfunktion der einen Hälfte des Pretrigger Boards 0x81. Für die beiden weiteren Einträge, die ebenfalls deutlich unterhalb der Schwelle liegen sind die Gründe unklar. Möglicherweise handelt es sich um Bitfehler in der Übertragung durch den First Level Trigger.*

Vergleich des Koordinatensystems der Simulation mit dem des speziellen Algorithmus zur Erzeugung der Lookuptables zeigte jedoch keinen Unterschied. Zusätzlich müsste sich eine solche Verschiebung deutlich in der ξ oder η Position der Cluster widerspiegeln.

Die einzige Erklärung liegt somit in einer Fehlfunktion innerhalb des Boards z. B. durch einen Bitfehler in der Übertragung der Energiewerte zur Lookuptable, die entscheidet, ob die Transversalenergie der Cluster oberhalb der Schwelle liegt. Entsprechende Untersuchungen des Boards sind eingeleitet worden. An den Hardware Clustern ohne Übereinstimmung beträgt der Anteil dieser Cluster ca. 21 %.

Der dritte Bereich, der Bereich hoher E_T-Werte in Abbildung 6.18, besitzt ebenfalls überproportional viele Cluster im Vergleich zum Referenzspektrum. Cluster in diesem Bereich lassen auf heiße oder rauschbehaftete Zellen schließen, die zu einer sehr großen Gesamtclusterenergie und damit zu einem entsprechend hohen E_T-Wert führen. Abbildung 6.20 zeigt die Positionen der Cluster die sich durch entsprechend hohe E_T-Werte auszeichnen. Man erkennt, dass eine größere Zahl der Cluster am Rand der Pretrigger Boards liegen. Da die Energieinformation von Zellen am Rand eines Pretrigger Boards, wie in Abschnitt 4.3.1 diskutiert, an mehrere Pretrigger Boards weitergeleitet werden müssen und die Information deshalb per Multiplexer vervielfacht wird, sind Randzellen anfälliger für Rauschen.

Wie schon in Abschnitt 6.4 angeführt, ist dies nur eine mögliche Erklärung, eine genauere Aussage über solche heißen Zellen lässt sich nur durch den in Kapitel 4.4.9 diskutierten Hardwaretest machen. Cluster mit außergewöhnlich hohem E_T-Wert nehmen an den Hardware Clustern ohne Übereinstimmung etwa einen Anteil von knapp 60 % ein.

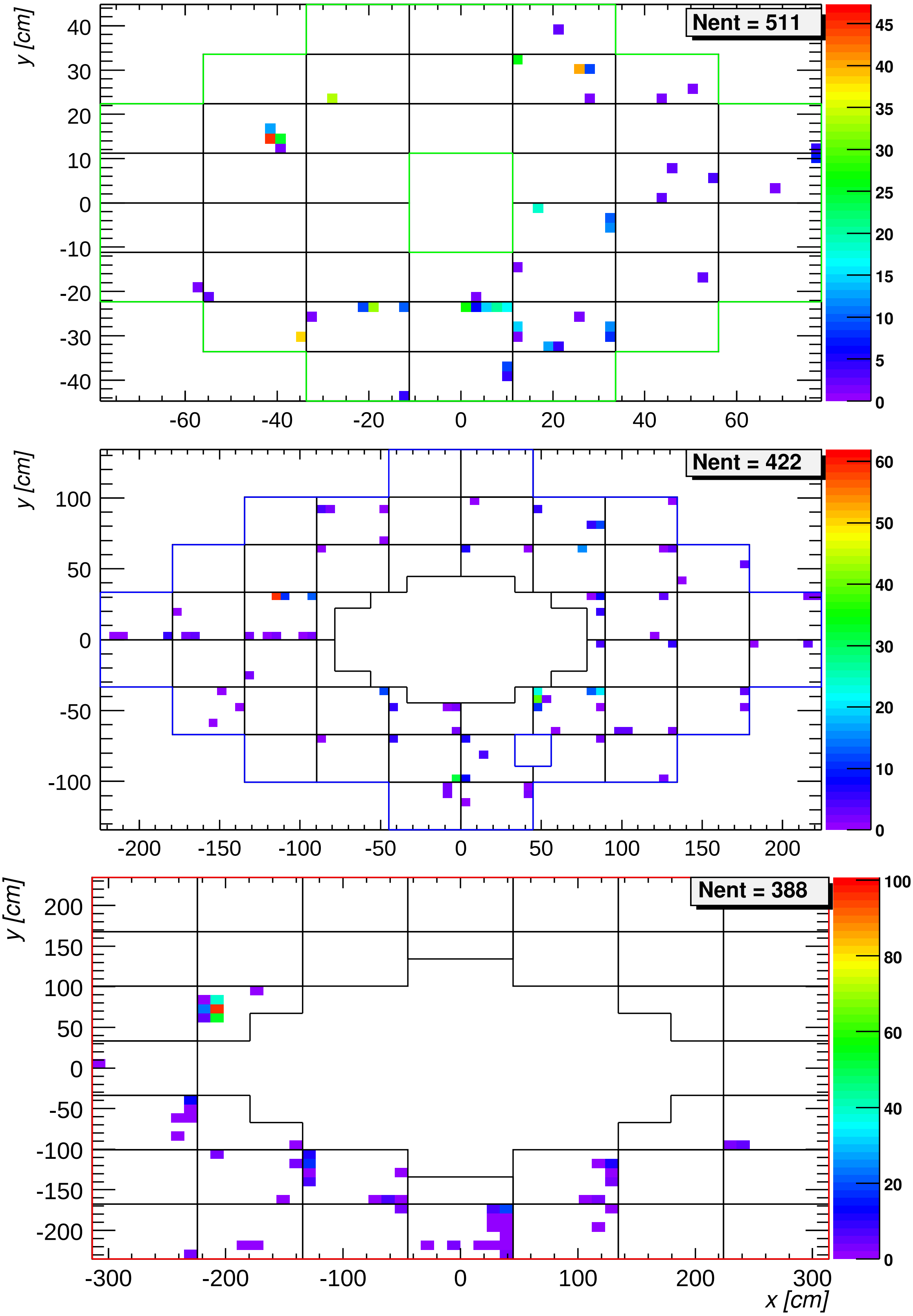


Abbildung 6.20: *Verteilung der Cluster ohne Übereinstimmung und mit heißen Zellen.*

Die restlichen knapp 20 % der Hardware Cluster ohne Übereinstimmung liegen im Bereich geringfügig oberhalb der E_T-Schwelle und können Schwelleneffekten durch geringfügig unterschiedliche Kalibration sowie Bitfehlern, wie in Abschn. 6.4 diskutiert, zugerechnet werden.

6.6 Fazit

In diesem Kapitel wurde der Vergleich der Simulation *EcalSIM* mit online genommenen Daten gezeigt. Ziel der Simulation ist es, die Pretrigger Nachricht des ECAL Pretrigger Systems bitgenau zu reproduzieren. Toleriert man kleinere Abweichungen in der Schwerpunktsposition sowie Abweichungen in der Energie, so ist die Simulation in der Lage im Mittel (98,36 ± 0,32) % der Pretrigger Nachrichten zu reproduzieren. Fordert man eine exakte Übereinstimmung der Pretrigger Nachrichten, so ist die Simulation in der Lage (95,46 ± 0,32) % der Pretrigger Nachrichten zu reproduzieren. Die Simulation zeigt somit eine hervorragende Übereinstimmung mit der Hardware und stellt ein zuverlässiges Werkzeug zur Analyse von MC Daten und online aufgezeichneten Daten dar.

Darüber hinaus beschreibt die Simulation die Hardware so exakt, dass sich auch Fehlfunktionen in der Hardware mittels der Simulation aufzeigen, genau lokalisieren und quantifizieren lassen. Die Simulation kann somit auch die Funktion eines Testwerkzeuges zur Bestimmung der Funktionsfähigkeit der Hardware übernehmen.

Die Unterschiede zwischen der Simulation und der Hardware lassen sich zum durch offensichtliche Fehlfunktionen der Hardware, wie z. B. in Bitfehlern in der Berechnung der Schwerpunktsposition, zum anderen durch Cluster, deren Transversalenergie unterhalb der Triggerschwelle lag und die das Trigger System nicht hätten auslösen dürfen, erklären. Schließt man die Cluster, die deutlich unterhalb der Schwelle liegen, und somit eine eindeutig identifizierbare Fehlfunktion des Hardware darstellen, aus dem Vergleich aus, so erhöht sich die Beschreibungseffizienz auf 98,5 % für eine lockere Übereinstimmung, 95,7 % für eine exakte Übereinstimmung. Untersuchungen zur Behebung der Fehlfunktionen der einzelnen Kalorimeterzellen sind eingeleitet worden.

Zur Untersuchung der weiteren Gründe für Unterschiede zwischen der Simulation und der Hardware wurden zusätzliche Tests mit der Simulation durchgeführt: Mögliche Ursachen für Cluster, die einen kleinen Unterschied zwischen der Pretrigger Nachricht des Simulations Clusters und des Hardware Clusters aufweisen, sind Rundungsfehler durch Verwendung von geringfügig unterschiedlichen Kalibrationskonstanten, Bitfehler bei der Berechnung und Übertragung der Energiewerte bzw. Positionen sowie rauschbehaftete, heiße und tote Kanäle.
Die Tests mit der Simulation zeigten, dass nur ca. 12 % der fehlerhaften Cluster mittels Rundungs- und Bitfehlern erklärt werden können – der überwiegende Teil der fehlerhaften Cluster ist damit rauschbehafteten, heißen und toten Zellen zuzurechnen. Eine exakte Vorhersage, welche Zellen rauschbehaftet oder tot sind, ist ohne aufwendigere Studien allerdings nicht möglich. Das gleiche gilt für tote Kanäle, die in der Simulation nicht maskiert sind.
Eine Verbesserung der Maskierung der Hardware und insbesondere die Behebung der Fehlfunktionen durch Reparatur der rauschbehafteten, heißen und toten Zellen sowie der Bitfehler sollte deshalb die Beschreibungseffizienz weiter erhöhen.

Ein genereller Test der Hardware in regelmäßigen Abständen, der sämtliche Pretriggerkanäle auf ihren Zustand und ihre Funktionsfähigkeit prüft und die Informationen über den Zustand der einzelnen Kanäle in einer Datenbank speichert, wäre somit sehr wünschenswert. Mit dem im Rahmen dieser Arbeit entwickelten Hardwaretest stehen zusammen mit der Pretrigger Simulation die dazu notwendigen Werkzeuge zur Verfügung. Generell stellt die Reproduktion der Runbedingungen gegenwärtig das größte Problem dar, da für die einzelnen Einstellungen wie Kalibrationskonstanten, Triggerschnitte, eingebaute Pretrigger Boards und maskierte Kanäle keine Datenbank existiert und die Bedingungen über einzelne Textfiles und Datumsangaben des Filesystems herausgesucht werden müssen. Dies macht es für ältere Runs sehr schwer, die Originaleinstellungen zu reproduzieren.

Darüber hinaus existieren bei dem hier untersuchten Run insofern ideale Bedingungen als er am Ende der Datennahmeperiode liegt und somit eine verbesserte Maskierung der fehlerhaften Kanäle im Vergleich zu Runs am Anfang der Datennahmeperiode besitzt. Zwar fand keine Reparatur fehlerhafter Zellen während der Datennahmeperiode statt, jedoch wurden die Testmethoden zur Bestimmung solcher Zellen über die Datennahmeperiode hin optimiert. Insbesondere Runs am Anfang der Datennahmeperiode leiden daher unter einigen nicht maskierten heißen Kanälen und Kanälen mit Bitfehlern, die die online gemessenen Pretrigger Cluster derart dominieren, dass ein Vergleich sehr erschwert wird. Zwar können diese Zellen prinzipiell auch nachträglich für die Untersuchungen „separat maskiert“ werden, da jedoch jede Zelle aufgrund des Clusterisierungsalgorithmus Einfluss auf mehrere Cluster besitzt, würde eine solche Maskierung einen nicht zu vernachlässigenden Teil des Kalorimeters wegschneiden.

Kapitel 7

ECAL Pretrigger J/ψ-Effizienz

In diesem Kapitel soll die Effizienz des ECAL Pretriggers während der Datennahme 2000 für den Nachweis der Leptonen des Zerfalls $J/\psi \rightarrow e^+e^-$ zum einen für die direkt produzierten J/ψ-Mesonen, zum anderen für die J/ψ-Mesonen des goldenen Zerfalls $B^o \rightarrow J/\psi K_s^o$ bestimmt werden und mögliche Verbesserungen der Effizienz aufgezeigt und diskutiert werden. Dazu werden auch einige der Diskussionen und Effizienzen aus Kapitel 5 wieder aufgegriffen.

Da sich die Pretrigger Bedingungen während der Datennahmeperiode durch den schrittweisen Einbau der Pretrigger Hardware und damit der Erhöhung der geometrischen Akzeptanz des Pretriggers ständig änderten, erfolgt die Bestimmung der Effizienz in diesem Kapitel für die Bedingungen des Pretrigger Runs 17195, der im letzten Kapitel ausführlich diskutiert wurde und der sich unter anderem dadurch auszeichnet, dass er eine wesentlich exaktere Dokumentation der Pretrigger- und Detektorbedingungen als andere Runs aufweist (vgl. Abschn. 6.1), was die Simulation des Runs erheblich vereinfacht und damit auch die Fehler der Effizienzbestimmung minimiert.
Sämtliche Effizienzen wurden mit der im Rahmen dieser Arbeit entwickelten Simulation *EcalSIM* mit Hilfe einer Monte Carlo Simulation bestimmt. Als Monte Carlo Datensatz wurde der in Kapitel 5 verwendete Monte Carlo Datensatz benutzt. Zusätzlich wurde das Pretrigger System in der Simulation an die Bedingungen des Runs 17195 angepasst (vgl. Abschn. 6.1.1).

7.1 Pretrigger Teileffizienzen

Neben den in Abschnitt 5.6 diskutierten idealisierten Effizienzen müssen für den Run 17195 zusätzlich die Ineffizienz durch Maskierung von Kalorimeterkanälen im Readout und Pretrigger System berücksichtigt werden. Die Gesamteffizienz ϵ_{Gesamt} des Pretriggers für den Zerfall $J/\psi \rightarrow e^+e^-$ ergibt sich deshalb aus dem Zusammenspiel der geometrischen Akzeptanz ϵ_{Geo} des Kalorimeters und des Pretrigger Systems, der Effizienz ϵ_{Pre} der Effizienz des Pretrigger Algorithmus inklusive der Pretriggerschnitte, der Ineffizienz η_{Mask} aufgrund der Maskierung von defekten Kalorimeterzellen bzw. der Elektronik dieser Zellen und der Effizienz der Extrapolation der gefundenen Cluster in die Superlage TC02 $\epsilon_{Extrapol}$ zu

$$\epsilon_{Gesamt} = \epsilon_{Geo} \cdot \epsilon_{Pre} \cdot (1 - \eta_{Mask}) \cdot \epsilon_{Extrapol} \ . \tag{7.1}$$

Sämtliche Effizienzen in diesem Kapitel beziehen sich im Falle der Leptoneffizienz auf

die Nachweiseffizienz pro Lepton, im Falle der Einzelleptoneffizienz auf die Nachweiseffizienz von mindestens einem Lepton pro Ereignis und im Falle der J/ψ-Effizienz auf die Nachweiseffizienz für beide Leptonen des Zerfalls $J/\psi \rightarrow e^+e^-$ der direkt produzierten J/ψ-Mesonen (vgl. Abschnitt 5.6.1).
Im Folgenden werden zunächst die einzelnen Beiträge zu den Effizienzen diskutiert, bevor in Abschnitt 7.2 die Effizienzen zusammengefasst werden, die Gesamteffizienz des Pretrigger Systems bestimmt wird und die systematischen Fehler der Effizienzbestimmung diskutiert werden.

7.1.1 Geometrische Akzeptanz

Da das Kalorimeter für den Run 17195 nur zum Teil mit Pretrigger und Readout Elektronik ausgestattet war, setzt sich die geometrische Akzeptanz ϵ_{Geo} aus der *Raumwinkelabdeckung des Elektromagnetischen Kalorimeters* ϵ_{Calo} und der geometrischen Abdeckung des Kalorimeters mit *eingebauter Readout- und Pretriggerelektronik* $\epsilon_{Elektronik}$ zusammen:

$$\epsilon_{Geo} = \epsilon_{Calo} \cdot \epsilon_{Elektronik} \ . \tag{7.2}$$

Die geometrische Akzeptanz des kompletten Elektromagnetischen Kalorimeters beträgt (61,9 ± 0,2) % für J/ψ-Mesonen, (79,1 ± 0,1) % pro Lepton und (96,6 ± 0,1) % für den Nachweis mindestens eines Leptons (vgl. Tabelle 5.14).
Abbildung 6.2 zeigt die aktiven Bereiche des Pretriggers für den Run 17195. Die geometrische Akzeptanz $\epsilon_{Elektronik}$ der Bedeckung des Kalorimeters mit Readout- und Pretriggerelektronik beträgt für den Run 17195 (92,2 ± 0,1) % pro Lepton, (97,4 ± 0,1) % für den Nachweis mindestens eines Leptons und (86,1 ± 0,2) % für J/ψ-Mesonen.

7.1.2 Effizienz des Pretrigger Algorithmus

Zur Effizienz der Clusterrekonstruktion des ECAL Pretrigger Systems tragen mehrere Faktoren bei. Neben einer generellen Rekonstruktionseffizienz des Pretriggers müssen die Effizienzen der beiden im Pretrigger verwendeten Schnitte auf die Transversalenergie der zentralen Zelle des Clusters und auf die Transversalenergie des Clusters berücksichtigt werden. Darüber hinaus erfolgte während der Datennahme 2000 die Berechnung der Cluster nur innerhalb einer *reduzierten Clustergröße*: Statt des vollen Clusterbereichs der neun Zellen eines 3×3-Zellen-Nonetts wurden nur die fünf Zellen des zentralen Kreuzes des Nonetts zur Clusterrekonstruktion verwendet (vgl. Abschn. 4.3.4).
Die Effizienz ϵ_{Pre} des Pretrigger Algorithmus setzt sich damit aus der Effizienz der Clusterrekonstruktion ϵ_{reco} ohne Pretriggerschnitte[1], der Effizienz $\epsilon_{Cluster}$ durch den Schnitt auf die Clusterenergie, der Effizienz ϵ_{Zelle} durch den Schnitt auf die Energie der zentralen Zelle sowie die Ineffizienz $\eta_{5Zellen}$ durch die Verwendung einer limitierten Clustergröße zusammen:

$$\epsilon_{Pre} = \epsilon_{reco} \cdot \epsilon_{Cluster} \cdot \epsilon_{Zelle} \cdot (1 - \eta_{5Zellen}) \ . \tag{7.3}$$

Für den Run 17195 wurde ein Schnitt von $E_T \geq 0{,}5$ GeV auf die Transversalenergie der zentralen Zelle und ein Schnitt von $E_T \geq 1{,}0$ GeV auf die Transversalenergie des Clusters durchgeführt. Tabelle 7.1 fasst die Rekonstruktionseffizienzen sowie die Effizienzen der beiden Schnitte zusammen (vgl. Abschnitt 5.6.1).

[1] aus technischen Gründen wurde zur Bestimmung dieser Zahl ein Minimal-Transversalenergieschnitt von $E_T \geq 0{,}1$ GeV verwendet.

	Einzellepton	Lepton	J/ψ
ϵ_{reco}	$92{,}8 \pm 0{,}1$	$84{,}0 \pm 0{,}2$	$70{,}3 \pm 0{,}2$
ϵ_{Zelle} $(E_{T_{Zelle}} \geq 0{,}5)$	$98{,}7 \pm 0{,}1$	$98{,}1 \pm 0{,}1$	$95{,}7 \pm 0{,}2$
$\epsilon_{Cluster}$ $(E_{T_{Cluster}} \geq 1{,}0)$	$70{,}6 \pm 0{,}2$	$58{,}0 \pm 0{,}2$	$33{,}6 \pm 0{,}2$

Tabelle 7.1: *Effizienzen des Pretrigger Algorithmus (in Prozent).*

Reduzierte Clustergröße

Da während der Datennahme 2000 eine sehr große Anzahl an Kanälen Rauschen bzw. Defekte zeigten, erfolgte die Clusterrekonstruktion im Pretrigger nur in einem aus fünf Zellen gebildeten Kreuz anstatt der üblichen neun Zellen einer 3×3 Matrix. Auf diese Weise ist man weniger anfällig für defekte Kanäle, dafür kann die reduzierte Clustergröße sich auf die rekonstruierte Energie auswirken, was zu Ineffizienzen führen kann.
Die relative Ineffizienz $\eta_{5Zellen}$ der Rekonstruktion mit der reduzierten Clustergröße im Vergleich zu einer Rekonstruktion mit voller Clustergröße beträgt pro Lepton $(4{,}3 \pm 0{,}1)$ %, für den Nachweis mindestens eines Leptons pro Ereignis $(3{,}2 \pm 0{,}1)$ % und $(9{,}1 \pm 0{,}1)$ % für den Nachweis von J/ψ-Mesonen.

7.1.3 Maskierung der defekten Readout- und Pretriggerkanäle

Einige der Kalorimeterkanäle zeigten während der Datennahme Defekte im Readout und im Pretrigger System. Die Defekte können drei Bereichen zugeordnet werden [HER 00]:

- *heiße Kanäle* (ca. 1,5 % der Kanäle)
  Als heißen Kanal bezeichnet man Kanäle, die eine wesentlich größere Belegungsdichte aufweisen, als der Durchschnitt der Kanäle um den entsprechenden Kanal herum. Der Grund für heiße Kanäle liegt hauptsächlich in defekten Pretrigger Board Signaleingängen.

- *kalte Kanäle* (ca. 1 % der Kanäle)
  Als kalten Kanal bezeichnet man Kanäle, die eine wesentlich niedrigere Belegungsdichte aufweisen, als der Durchschnitt der Kanäle um den entsprechenden Kanal herum. Ursache für kalte Kanäle sind defekte Stromversorgungen, defekte Sender auf den Readout Boards, defekte Kabel zwischen Readout und Pretrigger Board sowie defekte Empfänger auf den Pretrigger Boards.

- *Kanäle mit Bitfehler* (ca. 5 % der Kanäle)
  Kanäle mit Bitfehlern übertragen die in Bitwerte kodierte Information falsch. Bitfehler entstehen durch eine fehlerhafte Übertragung, defekte Kabel zwischen Readout und Pretrigger Board sowie durch Fehler im Pretrigger Board.

Abbildung 6.3 zeigt die im Readout System maskierten Kanäle, Abbildung 6.4 die im Pretrigger System maskierten Kanäle für den Run 17195. Tabelle 6.2 gibt einen Überblick über die prozentuale Maskierung und die Gesamtzahl der maskierten Kanäle.
Die Auswirkungen der Maskierung sind abhängig davon, ob die Maskierung im Pretrigger oder im Readout Board erfolgt: Während ein im Readout Board maskierter Kanal für die gesamte Rekonstruktion im Pretrigger und in allen höheren Triggerstufen „verloren“

ist, beeinflusst ein im Pretrigger Board maskierter Kanal dagegen nur das Pretrigger System. Daneben kann ein Pretriggerkanal aufgrund der Überlappung der Pretrigger Boards verschiedenen Pretrigger Boards gleichzeitig zugeordnet sein. Dementsprechend kann er auch separat für jedes Board markiert werden, sodass er auf den anderen, mit ihm verbundenen Boards, trotzdem noch verwendet werden kann.

Durch die Maskierung der Kalorimeterkanäle im Readout Board wurde für den Run 17195 eine relative Ineffizienz von (11,4 ± 0,2) % pro Lepton, (13,4 ± 0,2) % für den Nachweis mindestens eines Leptons und (21,4 ± 0,5) % für den Nachweis der J/ψ-Mesonen erreicht. Durch die Maskierung im Pretrigger System wurde eine relative Ineffizienz von (10,7 ± 0,2) % pro Lepton, (12,7 ± 0,2) % für den Nachweis mindestens eines Leptons pro Ereignis und (16,2 ± 0,4) % für den Nachweis der J/ψ-Mesonen erreicht, jeweils im Vergleich zu einem optimal arbeitenden Pretrigger System.
Da teilweise die gleichen Kanäle in den Readout und Pretrigger Boards maskiert wurden, sind die beiden Effizienzen für Readout- und Pretrigger Board nicht unabhängig. Die relative Ineffizienz η_{mask} der kombinierten Maskierung im Readout und im Pretrigger Board beträgt (20,7 ± 0,3) % pro Lepton, (21,2 ± 0,2) % für den Nachweis mindestens eines Leptons pro Ereignis und $(37,0 \pm 0,5)$ % für den Nachweis der J/ψ-Mesonen.

7.1.4 Extrapolationseffizienz

Zusätzlich zur Rekonstruktion der Cluster im elektromagnetischen Kalorimeter besitzt der Pretrigger auch die Aufgabe, die Cluster in die unmittelbar vor dem Kalorimeter liegende Superlage TC02 zu extrapolieren. Für die Einstellungen der Suchregionsbreiten während der Datennahmeperiode 2000 betrug die Effizienz der Extrapolation (96,4 ± 0,1) % pro Lepton, (97,0 ± 0,1) % für den Nachweis mindestens eines Leptons pro Ereignis und (93,4 ± 0,3) % für den Nachweis der J/ψ-Mesonen.

7.2 Gesamteffizienzen und systematische Fehler

Tabelle 7.2 fasst die einzelnen Effizienzen gemeinsam mit den erreichbaren Effizienzen zusammen. Man erkennt, dass die größten Verluste durch den Schnitt auf die Transversalenergie des Clusters, die Geometrie des Kalorimeters bzw. des mit Elektronik ausgestatteten Teiles des Kalorimeters und die Maskierung der defekten Zellen entstehen.
Zusätzlich zu den Nachweiseffizienzen der direkt produzierten J/ψ-Mesonen wurden auch die Nachweiseffizienzen der Leptonen des goldenen Zerfalls $B^o \rightarrow J/\psi K^o_s$ bestimmt. Tabelle 7.3 fasst die Gesamteffizienzen für diesen Zerfall zusammen. Man erkennt, dass die Effizienzen sich nur geringfügig von den Nachweiseffizienzen des Zerfalls der direkt produzierten J/ψ-Mesonen unterscheiden.

7.2.1 Systematische Fehler

Systematische Fehler in der Orts- und Energiebestimmung

Sowohl die Bestimmung der Teilchenenergie als auch die Bestimmung des Teilchenortes unterliegen bei ihrer Messung im Kalorimeter möglichen systematischen Fehlern die sich aufgrund der Triggerschnitts auf die Transversalenergie des Clusters auf die Effizienz des Pretriggers auswirken können.

	Run 17195			erreichbar		
	Einzel-lepton	Lepton	J/ψ	Einzel-lepton	Lepton	J/ψ
Geometrie						
Kalorimeter	96,6 ± 0,1	79,2 ± 0,2	61,9 ± 0,2	96,6	79,2	61,9
Installierte Readout & Pretrigger Boards	97,4 ± 0,1	92,9 ± 0,1	86,1 ± 0,2	100	100	100
Gesamt	94,1 ± 0,1	73,6 ± 0,2	53,1 ± 0,3	96,6	79,2	61,9
Pretrigger Algorithmus						
Rekonstruktion ($E_T \geq$ 0,1 GeV)	92,8 ± 0,1	84,0 ± 0,2	70,3 ± 0,2	92,8	84,0	70,3
Cluster-Schnitt ($E_T \geq$ 1,0 GeV)[a]	70,6 ± 0,2	58,0 ± 0,2	33,6 ± 0,3	70,6	58,0	33,6
Zell-Schnitt ($E_T \geq$ 0,5 GeV)[b]	98,7 ± 0,1	98,1 ± 0,1	95,7 ± 0,2	98,7	98,1	95,7
Reduzierte Clustergröße (1-$\eta_{5Zellen}$)	96,8 ± 0,1	95,7 ± 0,1	90,9 ± 0,1	100	100	100
Gesamt	62,6 ± 0,3	45,7 ± 0,3	20,5 ± 0,4	64,7	47,8	22,6
Maskierung von Zellen						
Readout Board (1-$\eta_{Mask\_Readout}$)	86,6 ± 0,2	88,6 ± 0,2	78,6 ± 0,5	—	—	—
Pretrigger Board (1-$\eta_{Mask\_Pretrigger}$)	87,3 ± 0,2	89,3 ± 0,2	79,2 ± 0,4			
Gesamt[c] (1-η_{Mask})	78,8 ± 0,3	79,3 ± 0,3	63,0 ± 0,6	95	95	90
Extrapolation nach TC02	97,0 ± 0,1	96,4 ± 0,1	93,4 ± 0,3	99,9	99	98
Gesamteffizienz	45,1 ± 0,4	25,7 ± 0,5	6,4 ± 0,8	59,3	33,8	12,3

Tabelle 7.2: *Pretriggereffizienzen für den Nachweis der direkt produzierten J/ψ-Mesonen für den Run 17195 (in Prozent). Die Effizienz setzt sich aus der geometrischen Akzeptanz, der Effizienz des Pretrigger Algorithmus, der Ineffizienz durch Maskierung von Zellen und der Extrapolationseffizienz zusammen. Die angegeben Lepton Effizienz bezieht sich auf die Nachweiseffizienz pro Lepton, die Einzelleptoneffizienz auf den Nachweis von mindestens einem Lepton pro Ereignis, die Effizienz der J/ψ-Mesonen auf den Nachweis beider J/ψ-Leptonen.*

[a] Eine höhere Effizienz lässt sich hier natürlich durch einen kleineren Schnittwert für die Transversalenergie erreichen. Jedoch erhöht dies zugleich die Pretriggerrate.

[b] Eine höhere Effizienz lässt sich hier natürlich durch einen kleineren Schnittwert für die Transversalenergie erreichen. Jedoch erhöht dies zugleich die Anzahl an Clusterkandidaten, die der Pretrigger bearbeiten muss, was insbesondere bei hohen Wechselwirkungsraten zu Sättigungseffekten führen kann.

[c] Da ein Kanal teilweise im Readout und im Pretrigger Board maskiert ist, sind die Effizienzen nicht unabhängig und die kombinierte Effizienz entspricht demnach nicht dem Produkt der Effizienzen.

	Effizienz [%]	
	direkte J/ψ	$B^o \to J/\psi K_s^o$
Einzellepton	45,1 ± 0,4	46,9 ± 0,4
Lepton	25,7 ± 0,5	27,1 ± 0,5
J/ψ	6,4 ± 0,4	7,4 ± 0,8

Tabelle 7.3: *Pretriggereffizienzen für den Nachweis von J/ψ-Mesonen aus dem Zerfall $B^o \to J/\psi K_s^o$ im Vergleich zu den Nachweiseffizienzen der direkt produzierten J/ψ-Mesonen.*

Für den systematischen Fehler der Ortsbestimmung ist die Genauigkeit, mit der die Position der einzelnen Kalorimeterzellen bekannt ist, entscheidend: Eine Messung der Größe der Kalorimeterzellen brachte eine Korrektur von weniger als 0,5 % gegenüber der ursprünglichen Designzellgröße [Vil 01]. Da diese Korrektur in der Monte Carlo Simulation berücksichtigt ist, dürfte der systematische Fehler in der absoluten Position der einzelnen Kalorimeterzellen deshalb weit unter 1 % liegen und somit vernachlässigbar sein.
Die Messung der korrekten Teilchenenergie im Kalorimeter ist von verschiedenen Faktoren abhängig: Die in einer Kalorimeterzelle deponierte Energie wird mittels einer zeitlichen Integration über den im Photomultiplier erzeugten Ladungsimpuls gemessen und anschließend digitalisiert. Bei dieser Messung kommt es auf ein zeitlich korrekt gesetztes Zeitfenster der Integration und Digitalisierung an, um den gesamten Ladungsimpuls zu messen. Nach der Digitalisierung der gemessenen Ladungsmenge erfolgt die Umrechnung der Ladungsmenge in einen absoluten Energiebetrag mittels der Kalibrationskonstanten des Kalorimeters. Auch diese Umrechnung unterliegt aufgrund der Unsicherheit in den Kalibrationskonstanten systematischen Fehlern.
Die Berechnungen der Energie in der Simulation und im Kalorimeter gehen davon aus, dass alle Protonenbunche zu festen, genau definierten Zeiten im Abstand von 96 ns am Target ankommen. Basierend auf diesen Zeiten erfolgt die Synchronisation der einzelnen Detektorsysteme und damit im Falle des elektromagnetischen Kalorimeters die Definition des 60 ns-Zeitfensters, in dem die Energiedeposition im Kalorimeter gemessen wird.
Werden Wechselwirkungen durch die zeitlich um $\Delta t = n \cdot 5$ ns ($n \in \mathbb{N}$) vom Hauptbunch verschoben liegenden Seitenbunche erzeugt, so kommt es zu einer zeitlichen Verschiebung der Energiedeposition im Kalorimeter. Je nach Größe der zeitlichen Verschiebung kann dies dazu führen, dass nur noch ein Teil der eigentlichen Energie gemessen wird.
Im Mittel stammen etwa 15 % von den ersten Seitenbunchen (n=1) und insgesamt bis zu 25 % der Wechselwirkungen von Seitenbunchen [Bak 00]. Damit werden mehr als 75 % der Wechselwirkungen korrekt konvertiert, für die restlichen 25 % hängt der Fehler von der zeitlichen Verschiebung ab. Da aber das zeitliche Fenster der Ladungsintegration im Kalorimeter mit 60 ns ausreichend groß gewählt ist, um Zeitfluktuationen von ± 5 ns zu tolerieren, ist zu erwarten, dass der Fehler bei der Energiebestimmung im allgemeinen auch bei den ersten Seitenbunchen vernachlässigbar klein ist und im Bezug auf alle Seitenbunche im Bereich weniger Prozent liegt.
Auch Coasting Beam[2] ist eine Quelle für zeitlich verschobene Ereignisse. Allerdings zeigen die Drähte des inneren und des unteren Targets nur einen sehr geringen Anteil an Coasting Beam, der deutlich unter 1 % liegt [Spr 00]. Da für den hier untersuchten Run

[2]Unter Coasting Beam versteht man Protonen die nicht bunchkorreliert sind und beliebig im Protonenspeicherring verteilt sind.

der Targetdraht „Inner 2“ verwendet wurde, sind die Fehler durch Coasting Beam ebenfalls vernachlässigbar. Bei Verwendung des äußeren bzw. oberen Targetdrahtes können die systematischen Fehler jedoch durchaus im Bereich einiger Prozent liegen.

Ereignisse von Nebenbunchen oder Coasting Beam, die eine größere Zeitunterverschiebung im Vergleich zu den Hauptbunchen besitzen, lassen sich ansonsten auch durch einen Schnitt auf die mittlere Driftzeit und den RMS-Wert der Driftzeiten der Spurkammern eliminieren, da die mittleren Driftzeiten solcher Ereignisse im Gegensatz zu den Driftzeiten von Ereignissen von Hauptbunchen verschoben sind.

Für die Kalibration der gemessenen Ladung in die Energie wurden von der Kalorimetergruppe Unsicherheiten im Bereich zwischen 1 und 5 %, abhängig von der Position im Kalorimeter gemessen. In einigen Bereichen, in denen eine Messung der Kalibrationsfehler nicht möglich war, wurden die Unsicherheiten in der Energiekalibration mit etwa 10 % abgeschätzt. Im Mittel sollten sie 5 % aber nicht überschreiten [Vil 00].

Bezüglich der Energiemessung dürften daher die Kalibrationsunsicherheiten den größten Beitrag zu der Unsicherheit in der Energiebestimmung leisten. Verbesserungen im systematischen Fehler der Energie- und Ortsbestimmung können deshalb hauptsächlich auch durch eine verbesserte Kalibration erzielt werden. Nimmt man alle Unsicherheiten zusammen, so kann die obere Grenze der Unsicherheit in der Energiebestimmung mit ungefähr 7% abgeschätzt werden.

Wie oben erwähnt wirkt sich die Unsicherheit in der Energiebestimmung auf den systematischen Fehler der Pretriggereffizienz aus: Eine 7 % Unsicherheit in der Energie führt durch die von der Triggerschwelle abhängige Effizienz zu ungefähr 10 % Unsicherheit in der Effizienzbestimmung (vgl. Abb. 5.26).

Systematische Fehler durch Fluktuationen in der Targetrate

Fluktuationen in der Targetrate können potenziell zu Veränderungen in der Pretriggereffizienz führen, indem es durch eine zu große Anzahl an Pretriggerkandidaten zu Beschränkungen in den einzelnen Pretriggerboards kommt: Durch eine Überschreitung der maximalen Anzahl an bearbeitbaren Kandidaten kann es dazu kommen, dass Cluster von J/ψ-Leptonen, die eigentlich gefunden würden, aufgrund der zu großen Zahl an Kandidaten nicht bearbeitet werden können und verworfen werden. Die normalen Ratenfluktuationen liegen bei HERA-B im Bereich von etwa ± 10 % [Kni 00]. In Kapitel 5 wurde die Effizienz bei einer Rate von 5, 10, 20 und 40 MHz bestimmt und gezeigt, dass die Effizienz nur sehr gering von der Rate abhängt. Vergleicht man z. B. die Effizienzen der verschiedenen Wechselwirkungsraten bei einem festen Triggerschnitt (z. B. von $E_{T_{Cluster}} \geq 1{,}0$ GeV) in Abbildung 5.28, so sieht man, dass die Effizienz nur um etwa 5 % variiert. Zwischen 5 und 10 MHz variiert die Effizienz sogar nur um weniger als 1 %. Somit sind die systematischen Fehler durch normale Fluktuationen vernachlässigbar.

Kommt es aufgrund einer sehr ungleichmäßigen Verteilung der einzelnen Bunchbeiträge zu mehreren hundert Wechselwirkungen pro BX, so gilt obige Abschätzung sicherlich nicht mehr und es kann zu Verlusten kommen. Dies ist jedoch ein generelles Problem für den Detektor, da auch die Spursuche im FLT dann aufgrund der zu hohen Belegungsdichte beeinträchtigt ist. Bunche dieser Art sollten deshalb bei Berechnungen der Effizienz ausgeschlossen werden.

Systematische Fehler in der Beschreibung der Hardware durch die Simulation

Im letzten Kapitel wurde die Übereinstimmung der Simulation *EcalSIM* mit der Hardware des Ecal Pretriggers untersucht und gezeigt, dass die Simulation die Hardware bei einer losen Übereinstimmung der Pretrigger Informationen zu mehr als 98 %, bei einer exakten Übereinstimmung zu 95 % beschreibt. Damit beträgt die obere Abschätzung des systematischen Fehlers 5 %.
In den gleichen Bereich fallen auch Fehlfunktionen der Hardware wie defekte, nicht korrekt maskierte Kanäle. Eine Verbesserung des systematischen Fehlers in diesem Bereich lässt sich deshalb vor allem durch eine bessere Kenntnis des Zustandes des Kalorimeters und des Pretriggers erzielen. Dies kann z. B. unter Verwendung des in Abschnitt 4.4.9 vorgestellten Hardwaretests zusammen mit der Simulation *EcalSIM* erreicht werden.

Systematische Fehler der Beschreibung der Daten durch die MC Simulation

Die bei HERA-B verwendeten Monte Carlo Datensätze der J/ψ-Zerfälle wurden in ihren p_T- und x_F-Spektren an die gemessenen Verteilungen des Experimentes E789 angepasst (vgl. Abbildung 5.1). Der durch eine ungenaue Beschreibung der Daten durch das Monte Carlo hervorgerufene systematische Fehler dürfte deshalb eher klein sein und sich hauptsächlich auf den Bereich negativer x_F-Werte beziehen, da das x_F-Spektrum des Experimentes E789 nur den Bereich für $x_F > -0,1$ abdeckt. Der Bereich negativer x_F-Werte liegt für das Experiment HERA-B im Bereich des äußeren Kalorimeter. Da die Anzahl an J/ψ-Leptonen mit der radialen Entfernung vom Strahlrohr abnimmt und der Bereich des äußeren Kalorimeters zusätzlich nur zur Hälfte mit Elektronik ausgestattet war und dementsprechend nur die Hälfte der Daten dieses Bereichs für die Analyse berücksichtigt wurden, sollte der systematische Fehler klein sein.

Der relevante systematische Fehler liegt somit in den Unsicherheiten in der Kalibration und beträgt etwa 10 %. Sollte dieser systematische Fehler durch eine Verbesserung der Kalibration reduziert werden, spielt auch der nächstgrößere Effekt, die Beschreibung der Hardware durch die Simulation, der im Bereich von 5 % liegt, eine Rolle. Allerdings ist zu erwarten, dass auch dieser Fehler mit einer Optimierung der Testmethoden und mit einer besseren Dokumentation des Zustandes der einzelnen Kalorimeterzellen sich verkleinert (vgl. Kapitel 6). Für den Run 17195 ergeben sich damit folgende Effizienzen:

$$\begin{aligned}
\text{Einzellepton:} \quad \epsilon &= (45,1 \pm 0,4 \pm 4,5)\% && (7.4)\\
\text{Lepton:} \quad \epsilon &= (25,7 \pm 0,5 \pm 2,6)\% && (7.5)\\
J/\psi: \quad \epsilon &= (6,4 \pm 0,8 \pm 0,6)\%\ , && (7.6)
\end{aligned}$$

bzw. für die Nachweiseffizienzen des Zerfalls der J/ψ-Mesonen aus dem goldenen Zerfall $B^o \to J/\psi K_s^o$

$$\begin{aligned}
\text{Einzellepton:} \quad \epsilon &= (46,9 \pm 0,4 \pm 4,7)\% && (7.7)\\
\text{Lepton:} \quad \epsilon &= (27,1 \pm 0,5 \pm 2,7)\% && (7.8)\\
J/\psi: \quad \epsilon &= (7,4 \pm 0,8 \pm 0,7)\%\ . && (7.9)
\end{aligned}$$

7.3 Optimierungsmöglichkeiten der Effizienz

Die Optimierungen der Effizienzen hängen hauptsächlich von den erreichbaren Bedingungen der Pretrigger Hardware ab. Die Komplettierung des Kalorimeters mit Readout- und Pretriggerelektronik, die für Beginn der Datennahme Herbst 2001 geplant ist, könnte die Effizienz um etwa 16 % steigern.
Durch eine Reparatur der defekten Kanäle könnte die Effizienz um knapp 59 % erhöht werden. Allerdings ist fraglich, ob alle Kanäle repariert werden können und anschließend optimal arbeiten. Abschätzungen der Pretrigger Gruppe gehen von einer verbleibenden Zahl von ca. 2 % an defekten Kanälen nach der Reparatur aus [HER 00]. Damit dürfte eine Restineffizienz von etwa 10 % bleiben.
Mit einer stark reduzierten Anzahl an defekten Kanälen sollte dann auch ein Betrieb unter Verwendung der vollen Clustergröße möglich sein (neun Zellen statt fünf), was zu einer Effizienzsteigerung von etwa 10 % führen würde.

Durch Wahl eines größeren Suchfensters im First Level Trigger bzw. durch Optimierung des Binnings in den Lookuptables des Pretriggers und damit einer Verbesserung der Orts- und Energieauflösung könnte die Extrapolationseffizienz des Pretriggers von derzeit 93,4 % auf etwa 98 % erhöht werden. Abschätzungen [Fle 01a] zeigen, dass dies die Rate des First Level Triggers in der Superlage TC02 um etwa 5 % erhöhen würde.

Eine weitere Erhöhung der Effizienz läßt sich durch Wahl eines kleineren Schnittwertes für den Schnitt auf die Clustertransversalenergie erreichen. So basieren z. B. die Untersuchungen des Proposals [Loh 94] und alle darin angegebenen Effizienzen auf einem Schnittwert von KTRIG von 700 GeV·cm. Dieser KTRIG entspricht ungefähr einem Transversalenergieschnitt von 0,7 GeV. Eine Verringerung des Transversalenergieschnitts von 1,0 auf 0,7 GeV erhöht die Effizienz um weitere 57 %. Bei welchem Wert der Schnitt gewählt werden kann, hängt vorallem stark von der verarbeitbaren Rate des First Level Triggers und des Second Level Triggers ab.

7.4 Fazit

In diesem Kapitel wurden die verschiedenen Teileffizienzen der Clustersuche und -rekonstruktion des Zerfalls $J/\psi \to e^+e^-$ im ECAL Pretrigger System untersucht und es wurde die Gesamteffizienz des ECAL Pretrigger Systems mit Hilfe der im Rahmen dieser Arbeit entwickelten Simulation *EcalSIM* bestimmt.
Die Nachweiseffizienz für den Zerfall $J/\psi \to e^+e^-$ beträgt für den Run 17195 und damit für das Ende der Datennahmeperiode 2000

$$\epsilon_{J/\psi_{direkt}} = (6,4 \pm 0,8 \pm 0,6)\% \; . \tag{7.10}$$

Eine zusätzliche Untersuchung der Nachweiseffizienzen des Zerfalls von J/ψ-Mesonen aus dem Zerfall $B^o \to J/\psi K_s^o$ zeigte eine vergleichbare Effizienz wie der Zerfall der direkt produzierten J/ψ-Mesonen:

$$\epsilon_{J/\psi_{golden}} = (7,4 \pm 0,8 \pm 0,7)\% \; . \tag{7.11}$$

Die wesentlichen Verluste in der Effizienz kommen durch eine nicht vollständige Abdeckung des Kalorimeters mit Readout- und Pretrigger Boards zum Zeitpunkt der Datennahme sowie durch die große Zahl an defekten Kanälen. Wenn für die Datennahme

2001/2002 das Kalorimeter komplett mit Ausleseelektronik bestückt ist und eine Reparatur der defekten Kalorimeterkanäle erfolgt, kann zusammen mit einer Optimierung der Breite der Suchregionen die Effizienz des Pretriggers auf etwa 12 bis 13 % erhöht werden. Es hat sich gezeigt, dass das Pretrigger System trotz der Vereinfachungen, die für die Implementation der Clustersuche und -rekonstruktion verwendet wurden, dem Kalorimeterrekonstruktionspaket CARE im Hinblick auf die Nachweiseffizienz in nichts nachsteht. Dementsprechend ist der Spielraum für weitere Verbesserungen hier sehr gering.
Eine weitere Erhöhung der Effizienz kann somit nur durch eine andere Wahl des Triggerschnitts erfolgen. Dabei wurde in Kapitel 5 gezeigt, dass der KTRIG-Schnitt keinerlei Vorteile gegenüber dem reinen Transversalenergieschnitt E_T bietet, sondern im Gegenteil eher zu höheren Raten tendiert. Dem im Proposal [Loh 94] vorgeschlagenen Triggerschnitt von $KTRIG \geq 350\,\mathrm{GeV}\cdot\mathrm{cm}$ für die zentrale Zelle des Clusters und $KTRIG \geq 700\,\mathrm{GeV}\cdot\mathrm{cm}$ für den Cluster entspricht ungefähr ein Schnitt von $E_T \geq 0{,}7\,\mathrm{GeV}$ für die Clusterenergie und $E_T \geq 0{,}35\,\mathrm{GeV}$ für die Energie der zentralen Zelle. Mit diesem Schnitt könnte die Effizienz um weitere 57 % auf knapp 25 % gesteigert werden. Dies führt jedoch gleichzeitig auch zu einer Erhöhung der Pretriggerrate von 350 kHz auf 1,7 MHz bei einer Wechselwirkungsrate von 5 MHz.

7.5 Ausblick

Während der Datennahme 2000 wurde für die gesamte Triggerkette nur eine sehr geringe Effizienz für den Zerfall $J/\psi \to e^+e^-$ erreicht. Eine der großen Herausforderungen ist es deshalb, die einzelnen Effizienzverluste der verschiedenen Triggerstufen zu verstehen. Wie in diesem Kapitel gezeigt, ist es mit Hilfe der Simulation *EcalSIM* jetzt zum einen möglich, genaue Aussagen über die Effizienz des Pretrigger Systems zu bekommen, zum anderen hat sich auch gezeigt, dass das ECAL Pretrigger System (abgesehen von Einschränkungen durch defekte Kanäle) funktioniert hat. Neben weiteren Studien zur Optimierung der Effizienz des Pretrigger Systems und des Einflusses auf den FLT und die höheren Triggerstufen ermöglicht dies jetzt eine genauere Bestimmung der Effizienzen der einzelnen Triggerstufen und Studien zur Erhöhung der Effizienz des Trigger Systems. Auch im Bereich physikalischer Analysen wurde die Simulation, z. B. bei der Bestimmung des Wirkungsquerschnitts des Zerfalls $J/\psi \to e^+e^-$, bereits eingesetzt [Sam 01]. Diese Studien haben auch gezeigt, dass im Moment eine eindeutige Identifikation eines J/ψ-Mesons im Elektronkanal bei HERA-B nur durch die Forderung nach dem Nachweis zweier Bremsstrahlungscluster der beiden Leptonen möglich ist. Auch der ECAL Pretrigger ist in der Lage, Bremsstrahlungscluster zu rekonstruieren und die Information dieser Cluster dem FLT für seine Entscheidungsfindung zur Verfügung zu stellen. So ist z. B. für die neue Datennahme geplant, die Triggerentscheidung im Falle der Elektronen auch auf den Nachweis eines zugehörigen Bremsstrahlungscluster zu basieren.
Während der Datennahme 2000 war jedoch die Bremsstrahlungskorrektur in der Pretrigger Hardware noch nicht funktionsfähig. Dementsprechend wurde sie in die Analyse dieser Arbeit nicht mit einbezogen. Die Bremsstrahlungskorrektur wurde jedoch bereits in die Simulation *EcalSIM* eingebaut und erste Tests durchgeführt. Neue Untersuchungen mit Hilfe der Simulation sind eingeleitet worden und sollen nun zeigen, in wieweit durch einen Einsatz der Bremsstrahlungskorrektur eine Erhöhung der Effizienz im FLT erreicht werden kann.

Zusammenfassung

Das Experiment HERA-B wurde als magnetisches Vorwärtsspektrometer zur Messung der CP-Verletzung im System der B-Mesonen geplant und produziert die B-Mesonen als hadronische B-Fabrik durch Wechselwirkungen der internen Drahttargets mit dem Protonenstrahl der Hadron-Elektron-Ringanlage HERA am DESY. Das sehr kleine Verzweigungsverhältnis der physikalisch interessanten goldenen Zerfälle erfordert zusammen mit der hohen Wechselwirkungsrate und der großen Anzahl an überlagerten Untergrundspuren ein sehr gutes Spur- und Teilchenidentifikationssystem und ein sehr schnelles und leistungsfähiges Trigger System. Zur Auswahl von Ereignissen des goldenen Zerfalls ist das Trigger System auf den Zerfall $J/\psi \to l^+l^-$ optimiert. Das Eingangssystem für den Zerfall $J/\psi \to e^+e^-$ stellt das ECAL Pretrigger System dar, das eine Clustersuche und -rekonstruktion im Elektromagnetischen Kalorimeter durchführt. Das Pretrigger System soll eine möglichst hohe Effizienz für den Nachweis der J/ψ-Elektronen bzw. Positronen besitzen und gleichzeitig eine möglichst geringe Zahl an Clusterkandidaten von Untergrundereignissen liefern. Charakterisiert wird das Pretrigger System deshalb durch seine Raten und seine Effizienzen, deren Kenntnis essentiell für physikalische Analysen sind.

Inhalt dieser Arbeit war die Entwicklung und Bereitstellung einer Simulation des ECAL Pretrigger Systems und die Untersuchung der Funktion, der Leistungsfähigkeit, der Effizienz und der Raten des Pretrigger Systems.

Die Simulation *EcalSIM* des ECAL Pretriggers wurde in einem objektorientierten Ansatz in C++ entwickelt und stellt eine detailgetreue Abbildung der Pretrigger Hardware dar. Sie ist in der Lage, die Pretrigger Nachricht bitgenau zu reproduzieren. Die Simulation erlaubt sowohl die Verarbeitung von Monte Carlo als auch von online aufgezeichneten Daten und eine flexible Anpassung an die Bedingungen der einzelnen Datennahmeperioden wie z. B. die Wahl der Triggerschnitte oder der eingebauten Elektronik. Mit Hilfe der Simulation *EcalSIM* steht damit jetzt im Rahmen der offiziellen HERA-B Software ein wichtiges Werkzeug zur Verfügung, das präzise Untersuchungen und Vorhersagen über das Trigger System ermöglicht und bereits in mehreren physikalischen Analysen Anwendung gefunden hat.

Ein Vergleich der simulierten Pretrigger Nachrichten mit den online aufgezeichneten Pretrigger Nachrichten mittels einer dafür durchgeführten Datennahme zeigte, dass die Simulation $(95{,}5 \pm 0{,}3)$ % der Pretrigger Nachrichten exakt reproduziert. Toleriert man kleine Abweichungen in der Position bzw. Energie der rekonstruierten Cluster, so werden sogar $(98{,}4 \pm 0{,}3)$ % der Pretrigger Nachrichten reproduziert. Die Simulation beschreibt damit die Pretrigger Hardware mit einer sehr hohen Präzision.
Eine systematische Untersuchung der verbleibenden Unterschiede zwischen Simulation und Hardware zeigte keine systematischen Fehlbeschreibungen der Simulation sondern

identifizierten stattdessen lokalisierte Fehlfunktionen der Hardware. Der größte Teil der Abweichungen ist hierbei auf nicht korrekt maskierte rauschbehaftete, heiße oder tote Kanäle zurückzuführen. Eine eindeutige Identifizierung und Maskierung solcher Kanäle verbessert neben der Beschreibungsgenauigkeit der Simulation auch die generelle Funktionsweise der Pretrigger Hardware. Zur Durchführung eines systematischen und regelmäßigen Tests aller Kalorimeterkanäle wurde deshalb in Kombination mit der Simulation ein spezieller Hardwaretest entwickelt der auf der Einspeisung von simulierten Clustern in das Kalorimeter und den anschließenden Vergleich der dadurch erzeugten Pretrigger Nachricht der Hardware mit der simulierten Pretrigger Nachricht basiert.

Die Untersuchung des Leistungsverhaltens des Pretrigger Algorithmus zeigte, dass die Vereinfachungen des Pretrigger Algorithmus im Vergleich zum Kalorimeterrekonstruktionspaket CARE nur zu unwesentlich schlechteren Auflösungen in Bezug auf die Auflösungen von CARE führen. Die Umsetzung des Algorithmus mittels Lookuptables und gebinnter Werte führt in einigen Bereichen zwar zu einer Verschlechterung der Auflösung, der Pretrigger Algorithmus erfüllt jedoch die Designauflösungen.

Die Nachweiseffizienz des Pretriggers für den Zerfall $J/\psi \rightarrow e^+e^-$ setzt sich aus verschiedenen Beiträgen zusammen: Neben der geometrischen Akzeptanz des Kalorimeters tragen die generelle Rekonstruktionseffizienz, die Effizienzen der beiden Schnitte auf die Transversalenergie des Clusters und der zentralen Zelle bei. Zusätzlich muss die Effizienz der Extrapolation der gefundenen Cluster in die sich unmittelbar vor dem Kalorimeter befindliche Spurkammerlage berücksichtigt werden, bei deren Untersuchung gezeigt wurde, dass diese Effizienz durch Optimierung des Suchfensters um 5% auf 98% erhöht werden kann.
Die erreichbare Effizienz des Pretrigger Systems wird in großem Maße durch den Schnitt auf die Transversalenergie des Clusters beeinflusst, der gleichzeitig auch die Pretriggerrate steuert. Die erlaubte Pretriggerrate hängt wiederum von der erlaubten Eingangsrate der ersten Triggerstufe ab. Generell zeigte ein Vergleich der beiden Schnittarten E_T und $KTRIG$, dass der E_T-Schnitt eine geringfügig höhere Effizienz bei vergleichbarer Rate als der $KTRIG$-Schnitt besitzt und deshalb für die zukünftigen Datennahmen zu favorisieren ist.

Nimmt man alle Teileffizienzen zusammen, so ergibt sich im Falle eines Schnittes auf die Transversalenergie des Clusters von $E_T \geq 1{,}0\,\mathrm{GeV}$ und auf die Transversalenergie der zentralen Zelle von $E_T \geq 0{,}5\,\mathrm{GeV}$ für ein einwandfrei arbeitendes und vollständig instrumentiertes Kalorimeter eine Pretriggereffizienz von $(13{,}1 \pm 0{,}6)\,\%$ für den Nachweis von direkt produzierten J/ψ-Mesonen. Ein genereller Vergleich der Effizienzen des Kalorimeterrekonstruktionspaket CARE und des Pretrigger Algorithmus zeigte, dass der Pretrigger praktisch die gleichen Effizienzen erreicht wie CARE.
Bei der Datennahmeperiode 2000 befand sich das Pretrigger System noch im Aufbau und in der Inbetriebnahmephase Die Bestimmung der einzelnen Teileffizienzen und der Gesamteffizienz für das Ende der Datennahmeperiode ergab eine Gesamteffizienz von $(6{,}4 \pm 0{,}8 \pm 0{,}6)\,\%$ für den Nachweis der direkt produzierten J/ψ-Mesonen und eine Effizienz von $(7{,}4 \pm 0{,}8 \pm 0{,}7)\,\%$ für den Nachweis der J/ψ-Mesonen aus dem goldenen Zerfall $B^o \rightarrow J/\psi K^o_s$.
Die größten Verluste gegenüber der maximal erreichbaren Effizienz für die verwendeten Triggerschnitte werden zu je gleichen Teilen durch die Maskierung defekter Kanäle sowie

durch eine unvollständige Abdeckung des Kalorimeters mit Pretriggerelektronik verursacht. Für die Datennahme 2001/2 ist geplant, das Kalorimeter komplett mit Elektronik auszustatten und die defekten Kanäle zu reparieren.

Die maximal mögliche Pretriggerrate hängt von den verarbeitbaren Raten und den Reduktionsfaktoren der weiteren Triggerstufen ab. Für das Design wurde bei einer Wechselwirkungsrate von 40 MHz davon ausgegangen, dass der ECAL Pretrigger mit der vollen BX-Rate von 8,52 MHz im Mittel zwei Clusterkandidaten liefern darf. Dies lässt sich durch einen Schnitt auf die Transversalenergie von $E_T \geq 0{,}7$ GeV erreichen, mit dem sich eine maximal erreichbare Gesamtpretriggereffizienz von etwa 26 % ergibt.
Für die Datennahmeperiode 2001/2 werden die Designanforderungen in der ersten und zweiten Triggerstufe nicht erreicht werden, sodass der Pretrigger nicht mit der vollen BX-Rate Clusterkandidaten liefern darf sondern selbst eine Reduktion durchführen muss und deshalb der Pretriggerschnitt entsprechend höher gewählt werden muss. Bei einer Wechselwirkungsrate von 10 MHz wird von einer maximal erlaubten Pretriggerrate von ungefähr 300 kHz ausgegangen. Dies lässt sich mit einem Triggerschnitt von etwa $E_T \geq 1{,}15$ GeV erreichen, mit dem sich die Pretriggergesamteffizienz auf ungefähr 10 % reduziert.

Zusätzlich hat sich bei der Datennahme 2000 gezeigt, dass eine Reduktion des J/ψ-Untergrunds auf ein verarbeitbares Niveau nur durch die Forderung, dass beide Elektronen des J/ψ-Zerfalls einen zugeordneten Bremsstrahlungscluster besitzen, möglich ist. Auch der ECAL Pretrigger ist in der Lage, mögliche Bremsstrahlungskandidaten der Elektronen zu rekonstruieren und als Teil der Pretrigger Nachricht an die erste Triggerstufe weiterzugeben. In der Track Parameter Unit der ersten Triggerstufe, in der die Rekonstruktion der Spuren erfolgt, kann dann ein Schnitt auf die Existenz dieser Cluster erfolgen und so ein saubereres J/ψ-Signal erreicht werden.
Die Bremsstrahlungskorrektur des Pretriggers ist in der Simulation *EcalSIM* des Pretriggers bereits integriert, ebenso ist sie in die ebenfalls im Rahmen dieser Arbeit zur Untersuchung der Eigenschaften der Track Parameter Unit entwickelten Simulation *TpuSIM* integriert worden. Erste Studien zur Untersuchung des Einflusses dieser Bremsstrahlungskorrektur haben begonnen.

Es hat sich gezeigt, dass der ECAL Pretrigger im Bezug auf seine Auflösungen und seine Funktion seine Designanforderungen erfüllt, die Effizienz jedoch stark von den erreichbaren Bedingungen des weiteren Trigger Systems abhängt. Mit der ECAL Pretrigger Simulation *EcalSIM* steht dem Experiment HERA-B jetzt ein wichtiges und präzises Werkzeug für die Datenanalyse zur Verfügung, das auch weiterführende Studien zu alternativen Triggerszenarien erlaubt.

Anhang A

Glossar

4LT (*Fourth Level Trigger*)
Vierte Auslösestufe

ADC (*Analog Digital Converter*)
Analog-Digital-Signalumwandler

ARTE (*Analysis and Reconstruction Tool and Environment*)
HERA-B Ereignis Rekonstruktionsumgebung

ASIC (*Application Specific Integrated Circuit*)
Allgemein versteht man darunter die Bezeichnung für einen Chip, der für eine spezifische Anwendung konzipiert wurde.

BABAR
Experiment am PEP II Beschleuniger des SLAC

BRI (*BRemstrahlungs Interface*)
Bremsstrahlungsschnittstelle des ECAL Pretrigger Board

BX (*Bunchcrossing*)
mittlere Protonenpaketrate

CARE (*CAlorimeter REconstruction package*)
Rekonstruktionspaket des Elektromagnetischen Kalorimeters

CERN (*Centre Européene pour la Recherche Nucléaire*)
Europäisches Zentrum für Kernforschung. Der offizielle Name des CERN lautet inzwischen *Organisation Européene pour la Recherche Nucléaire.*

COG (*Center Of Gravity*)
Schwerpunktsposition

CTRL (*ConTRoL*)
Prozesskontrolleinheit des Pretrigger Boards

DCAL (*Digitized CALorimeter*)
ARTE-Tabelle zur Speicherung der digitalisierten Kalorimeterinformationen

DESY (*Deutsches Elektronen SYnchrotron*)

DPRAM (*Dual Port RAM*)
RAM, bei dem man durch zwei Kanäle innerhalb eines Zyklusses schreiben und lesen kann.

EBM (*Event Buffer and Multiplexer*)
Ereignisspeicher und -vervielfacher des ECAL Pretrigger Boards

ECAL (*Electromagnetic Calorimeter*)
Elektromagnetisches Kalorimeter

FCG (*Fast Clock Generator*)
Zeitsignal-Generator innerhalb des Pretrigger Boards

FCS (*Fast Control System*)
Schnelles Kontroll System. Kontrollsystem zur Synchronisation der Auslese der HERA-B Detektoren

FED (*Front End Driver*)
Bezeichnung für den Teil der Elektronik, der direkt am Detektor sitzt und der unmittelbaren Auslese der Detektoren dient.

FIFO (*First In First Out*)
Ordnungsschema bei Speichern mit sequenziellem Zugriff, nach dem die zuerst eingegebenen Daten als Erste wieder gelesen werden, ähnlich wie bei einem Schieberegister.

FLT (*First Level Trigger*)
Erste Auslösestufe

FNAL (*Fermi National Accelerator Laboratory*)

FPGA (*Field Programmable Gate Array*)
Programmierbare Logikeinheiten

FRITIOF
Ereignisgenerator für Wechselwirkungen zwischen Hadronen und Kernen

GEANT (*GEometry ANd Tracking*)
Detektor Beschreibungs- und Simulationsprogramm

GEM (*Gas Electron Multiplier*)
Gaselektronenvervielfacher

HERA (*Hadron-Elektron-Ring-Anlage*)
Elektron-Proton-Ringanlage am DESY

IIF (*Input InterFace*)
Eingangsschnittstelle des ECAL Pretrigger Boards

ITR (*Inner Tracking System*)
Inneres Spurkammersystem

JETSET
Ereignisgenerator für MC Ereignisse

KTRIG
Bezeichnung für eine Art des Energieschnitts im Trigger System, ähnlich dem Transversalenergieschnitt

KUIP (*Kit for a User Interface Package*)
Benutzerschnittstellen Paket, enthalten in der CERN Programmbibliothek

LHC (*Large Hadron Collider*)
'Großer Hadronenkollidierer', Ringanlage am CERN

LMFU (*Local Maxima Finding Unit*)
Clustersucheinheit des ECAL Pretrigger Boards zur Aufspürung von lokalen Maxima und damit von Clusterkandidaten

LUT (*Lookuptable*)
Nachschlagetabelle, realisiert in einem Speicherbaustein

MBUF (*Message Buffer*)
Nachrichtenspeicher

MC (*Monte Carlo*)
Simulationsform zur Simulation von physikalischen Wechselwirkungen im Computer

MIPS (*Minimal Ionising ParticleS*)
Minimal ionisierende Teilchen

MSGC (*Micro Strip Gaseous Chamber*)
Mikrostreifen Gaskammer

MUON
Myonspurkammersystem

OTR (*Outer Tracking System*)
Äußeres Spurkammersystem

PEP (*Positron-Electron Project*)
Elektron-Positron-Beschleuniger am SLAC

Pretrigger
Vorauslösestufe

PYTHIA
Ereignisgenerator für MC Ereignisse

RAM (*Random Access Memory*)
Speicher mit wahlfreiem Zugriff

RICH (*Ring Imaging Cherenkov Counter*)
Ringabbildender Čerenkov-Zähler

ROI (*Region Of Interest*)
Suchregion

SHARC (*Super Harvard ArchitectuRe Computer*)
Name eines Digitalen Signalprozessors der Firma Analog Devices

SLAC (*Stanford Linear Accelerator*)
Standford Linear Beschleuniger

SLB (*Second Level Buffer*)
Mit SHARCs aufgebautes System von Datenzwischenspeichern, welches die Daten eines Ereignisses während der Ausführung der zweiten Triggerstufe speichert.

SLT (*Second Level Trigger*)
Zweite Auslösestufe

SVD (*Silikon Vertex Detector*)
Siliziumstreifen Vertexdetektor

TDI (*TFU Destination ID*)
TFU Ziel-Kennnummer

TDU (*Track Decision Unit*)
FLT Board zur Kombination verschiedener rekonstruierter Spuren und zur Triggerentscheidung

TFU (*Track Finding Unit*)
FLT Board zur Spursuche im Spurkammersystem

TLT (*Third Level Trigger*)
Dritte Auslösestufe

TTL (*Transistor Transistor Logik*)
Gruppe digitaler logischer Halbleiterschaltungen, bei der zur Verknüpfung und Verstärkung von Signalen Transistoren verwendet werden

TPU (*Track Parameter Unit*)
FLT Board zur Rekonstruktion der kinematischen Parameter

TRD (*Transission Radiation Detector*)
Übergangsstrahlungsdetektor

VDS (*Vertex Detektor System*)
Vertex Detektor

VME (*Versa(bus) Module Europe*)
Normierte 64 Bit breite Schnittstelle

VMIF (*VME Interface and Message Formatter*)
VME Schnittstelle und Nachrichtenformatierer

WIM (*Wire Memory*)
Drahtspeicher der TFUs zur Speicherung der Trefferinformationen

Anhang B

Pretrigger Clustermultiplizitäten

.

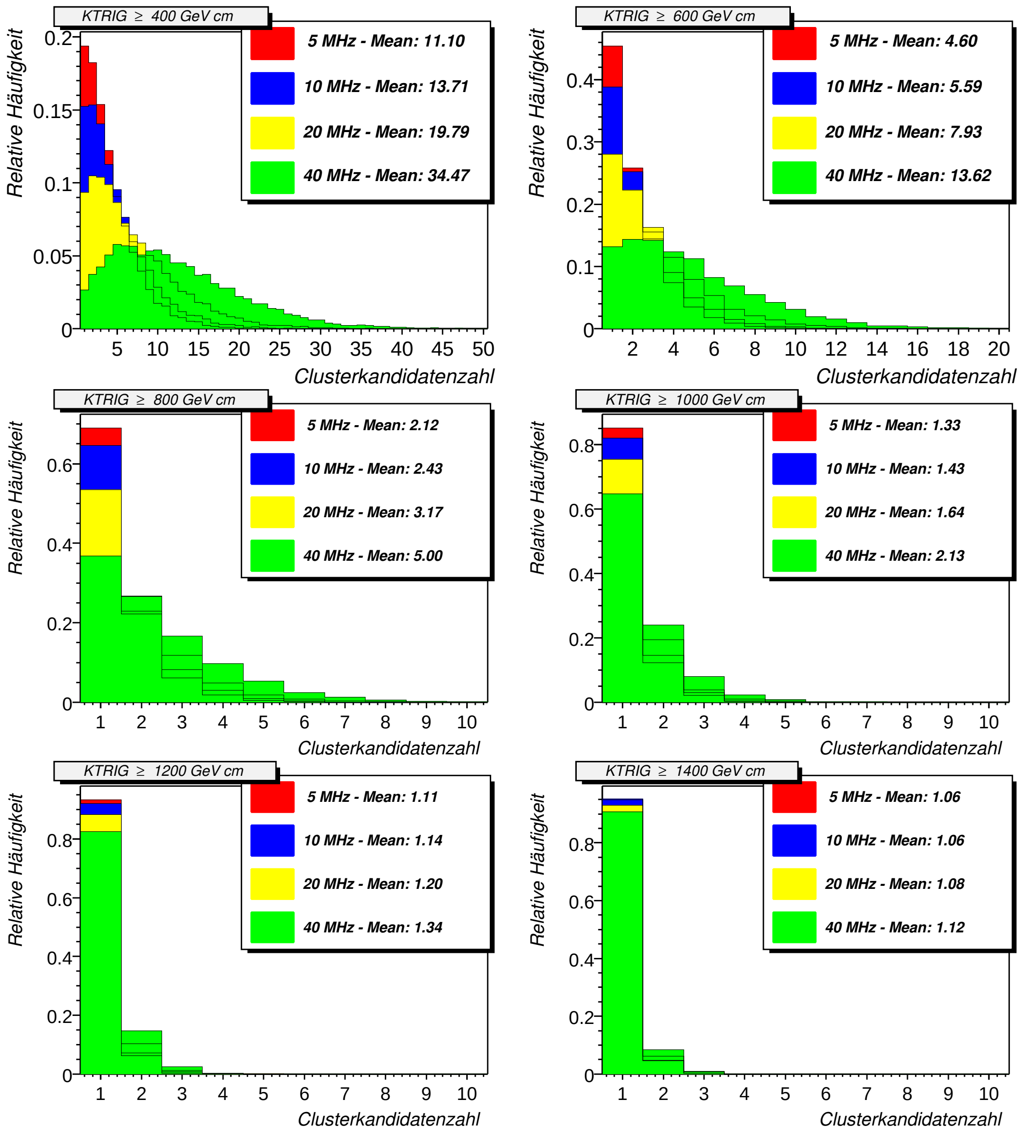


Abbildung B.1: *Verteilungen der Anzahl an Pretrigger Clustern für verschiedene KTRIG-Pretrigger Schnitte.*

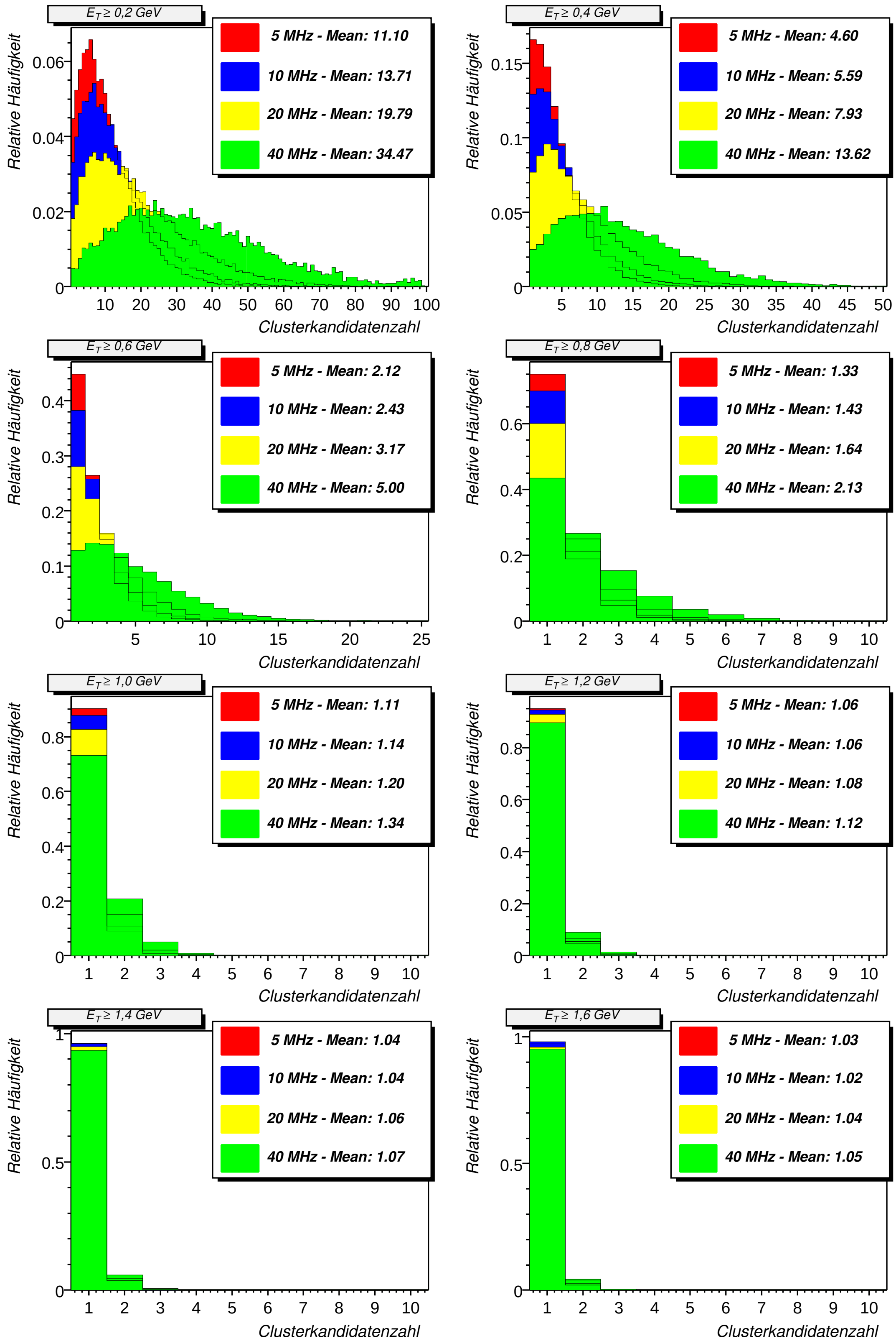
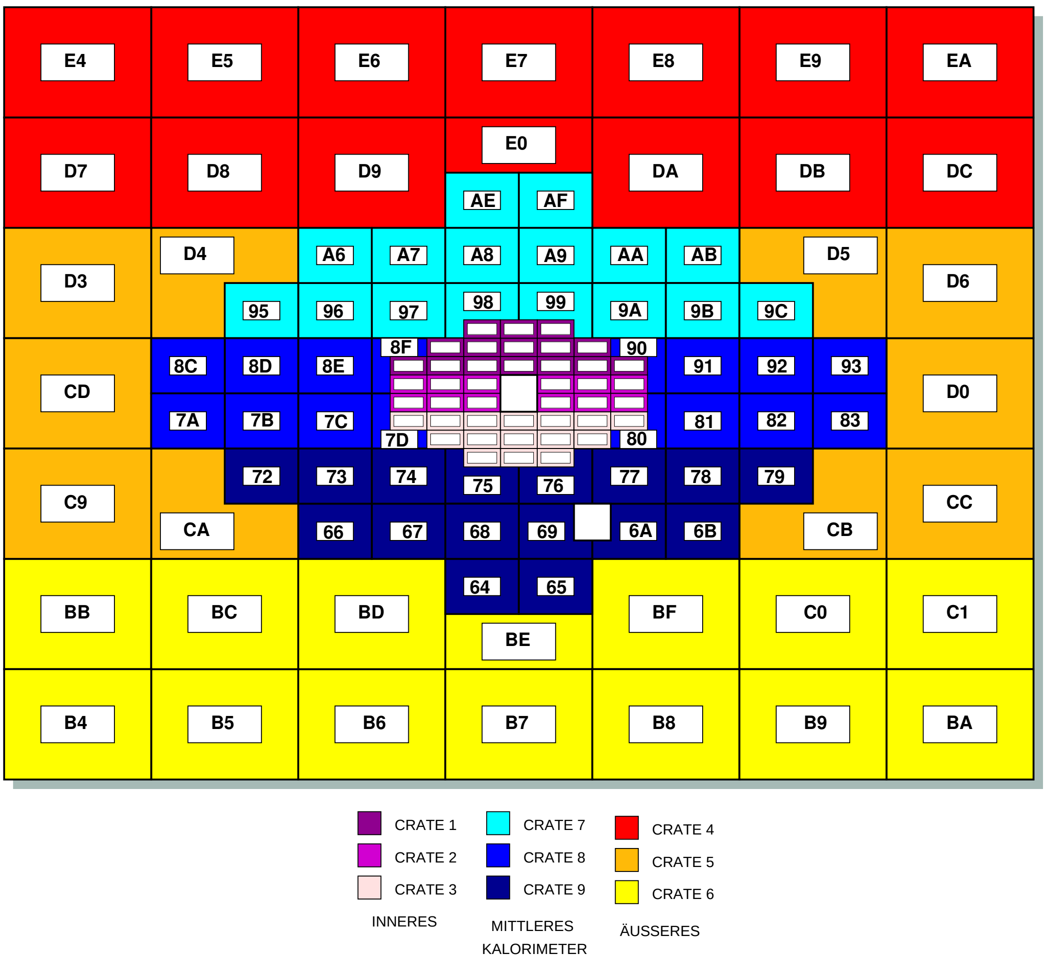
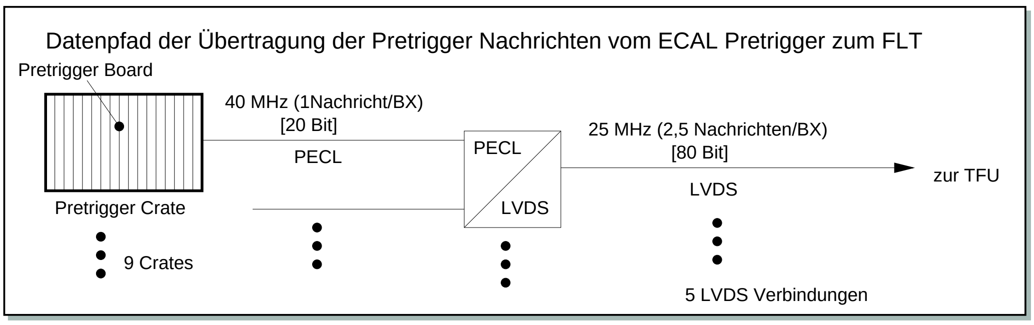


Abbildung B.2: *Verteilungen der Anzahl an Pretrigger Clustern für verschiedene E_T-Pretrigger Schnitte.*

Anhang C

Pretrigger Crates und Datenpfad der Pretrigger Nachricht





Quellenverzeichnis

[Abe 01] K. Abe *et al.* (Belle Kollaboration)
Observation of Large CP violation in the Neutral B Meson System.
Belle preprint 2001-10 (2001)

[Abr 99] M. C. Abreu *et al.* (NA50 Kollaboration)
Latest results from NA50 on J/ψ suppression in Pb Pb collisions.
Nucl. Phys. A **661** (1999) 93

[Abt 97] I. Abt *et al.* (H1 Kollaboration)
The H1 detector at HERA.
Nucl. Instr. and Meth. **A 386** (1997) 310

[Ack 98] K. Ackerstaff *et al.* (HERMES Kollaboration)
The HERMES spectrometer.
Nucl. Instr. and Meth. **A 417** (1998) 230

[Aff 98] A. Affolder *et al.* (KTeV Kollaboration)
Fermilab Preprint, vorgest. beim Heavy Quark '98 Workshop, Fermilab (1998)

[Alb 97] V. Alberico *et al.*
The HERA-B electromagnetic calorimeter pre-trigger system.
Nuovo Cim. A **110** (1997) 1453

[Alb 97a] V. Alberico *et al.*
The HERA-B electromagnetic calorimeter readout and pretrigger system.
Proc. VII Intern. Conf. on Calor. in High Energy Phys., World Scient. (1997)

[Alb 97b] V. Alberico *et al.*
The reconstruction for the electromagnetic calorimeter of the HERA-B experiment.
Proc. VII Intern. Conf. on Calor. in High Energy Phys., World Scient. (1997)

[Ale 94] R. Aleksan, B. Kayser und D. London
Determining the Quark Mixing Matrix From CP-Violating Asymmetries.
Phys. Rev. Lett. **73** (1994) 18

[Ale 99] T. Alexopoulos *et al.*
A measurement of the b anti-b cross section in 800-GeV/c proton silicon interactions.
Phys. Rev. Lett. **82** (1999) 41

[Ama 98] S. Amato *et al.* (LHCb Kollaboration)
LHCb technical proposal.
CERN-LHCC-98-4.

[Amm 98] R. Ammar *et al.* (ARGUS Kollaboration)
B meson results from ARGUS.
Uppsala 1987 Proceedings, High Energy Physics Vol. 1 (1987) 360

[Ang 98] A. Angelopoulos *et al.* [CPLEAR Collaboration]
First direct observation of time-reversal non-invariance in the neutral-kaon system.
Phys. Lett. B **444** (1998) 43

[Art 96] HERA-B Software Group
ARTE The Event Reconstruction and Analysis Tool for HERA-B.
HERA-B Interne Veröffentlichung (1996)

[Aub 01] B. Aubert *et al.* (BaBar Kollaboration)
Observation of CP violation in the B^o meson system.
hep-ex/0107013 (2001)

[Aub 01a] B. Aubert *et al.* (BaBar Kollaboration)
Measurement of CP-Violating Asymmetries in B^o Decays to CP Eigenstates.
Phys. Rev. Letters **86** (2001) 2515

[Avo 96] G. Avoni *et al.*
Designing Criteria for the ECAL readout.
HERA-B Note 96-180 (1996)

[Avo 96a] G. Avoni *et al.*
The ECAL readout board.
HERA-B Note 96-182 (1996)

[Avo 96b] G. Avoni *et al.*
The ECAL pretrigger system.
HERA-B Note 96-183 (1996)

[Bak 00] G. Baki
Untersuchung der Wechselwirkungsraten einzelner Protonenbunche mit dem HERA-B Target.
Diplomarbeit, Universität Dortmund (2000)

[Bal 97a] C. Baldanza *et al.*
A cellular automaton for cluster selection in the HERA-B pretrigger board.
HERA-B Note 97-177 (1997)

[Bal 97b] C. Baldanza *et al.*
HERA-B ECAL Pretrigger Board Description.
HERA-B Note 97-178 (1997)

[Bal 97c] C. Baldanza *et al.*
Pipeline architecture of the HERA-B pretrigger controller.
HERA-B Note 97-179 (1997)

[Bar 00] M. Bargiotti *et al.*
Present knowledge of the Cabibbo-Kobayashi-Maskawa matrix.
Riv. Nuovo Cim. **23N3** (2000) 1

[Bat 62] R. Battin
Am. Rocket Soc. **32** (1962) 1681

[Ben 96] A. Benedettini *et al.*
The electromagnetic calorimeter of the HERA-B experiment.
Proc. VI Conf. Calor. in High Energy Phys., Frasc. Phys. Ser. Vol. VI (1996)

[Ber 79] E. L. Berger und S. J. Brodsky
Quark Structure Functions Of Mesons And The Drell-Yan Process.
Phys. Rev. Lett. **42** (1979) 940

[Ber 80] E. L. Berger
Higher Twist Effects In Deep Inelastic Scattering.
Phys. Lett. B **89** (1980) 241

[Bob 99] B. Bobchenko *et al.*
HERA-B Electromagnetic Calorimeter.
Proc. VIII Intern. Conf. on Calor. in High Energy Phys., World Scient. (1999)

[Bou 97] R. Bouclier *et al.*
The Gas Electron Multiplier (GEM).
IEEE Trans. Nucl. Sci **44** (1997) 646

[Bra 93] A. Brandenburg, O. Nachtmann und E. Mirkes
Spin effects and factorization in the Drell-Yan process.
Z. Phys. C **60** (1993) 697

[Bru 01] M. Bruschi.
Private Mitteilung. (2001)

[Cap 00] M. Capeans
Status of the outer tracker for the HERA-B experiment.
Nucl. Instrum. Meth. A **446** (2000) 317

[Cas 00] D. E. Groom *et al.* (Particle Data Group Kollaboration)
Review of particle physics.
Eur. Phys. J. C **15** (2000) 1

[CER 99] *Experiments at CERN in 1999.*
Genf, Schweiz: CERN (1999)

[Chr 64] J. H. Christenson, J. W. Cronin, V. L. Fitch und R. Turlay
Evidence For The 2π Decay Of The K_2^o Meson.
Phys. Rev. Lett. **13** (1964) 138

[Coh 77] C. Cohen-Tannoudji, B. Diu und F. Laloë
Quantum Mechanics.
Vol. 1 John Wiley & Sons, New York (1977)

[Das 95] A. Das und T. Ferbel
Kern- und Teilchenphysik.
Spektrum Akademischer Verlag, Heidelberg (1995)

[Dev 82] R. A. Devijver und J. Kittler
Pattern recognition, A Statistical Approach.
Prentice-Hall Int, Inc. London (1982)

[Dre 70] S. D. Drell und T. Yan
Massive Lepton Pair Production In Hadron - Hadron Collisions At High-Energies.
Phys. Rev. Lett. **25** (1970) 316

[Dre 98] H.-D. Dreis *et al.*
Operation of a large GEM-MSGC detector in a high intensity hadronic test beam using fully pipelined readout electronics.
HERA-B Note 98-149 (1998)

[Duj 00] D. Dujmic, R. Eckmann und R.F. Schwitters
Performance of the HERA-B RICH.
HERA-B Note 00-020 (2000)

[Eck 96] R. Eckmann
The HERA-B Magnets.
HERA-B Note 96-087 (1996)

[Ehr 97] K. Ehret
Performance of the HERA-B target and interference with HERA operation.
International Symposium on Near Beam Physics, Batavia, IL (1997)

[Ehr 01] K. Ehret
Private Mitteilung. (2001)

[Eva 01] L. R. Evans
The Large Hadron Collider: Present status and prospects.
CERN-OPEN-2001-027

[Fal 86] S. Falciano *et al.* (NA10 Kollaboration)
Angular Distributions Of Muon Pairs Produced By 194-GeV/c Negative Pions.
Z. Phys. C **31** (1986) 513

[Fla 99] J. Flammer
The HERA-B First Level Trigger.
Posterpräsentation, SLAC summer institute (1999)

[Fla 00] J. Flammer
HERA-B FLT Status Report.
HERA-B Note 00-161

[Fla 01] J. Flammer
Track Parameter Unit - Documentation.
HERA-B Note 01-055 (2001)

[Fla 01a] J. Flammer
Simulation des First Level Triggers von HERA-B zur Untersuchung der Triggerperformance.
DPG Frühjahrstagung Heidelberg (1999)

[Fla 01b] J. Flammer
EcalSIM - The Ecal Pretrigger Simulation.
HERA-B Note 01-054 (2001)

[Fla 01c] J. Flammer, M. Nörenberg
Doc++ Dokumentation der Klasse l1sFLTMessage.
`http://www.desy.de/~mino/l1sDocpp/l1sFLTMessage.html` (2001)

[Fle 01] H. Fleckenstein und D. Ressing
Track Finding Unit Calculations.
FLT Internal Note (2001)

[Fle 01a] H. Fleckenstein
Private Mitteilung. (2001)

[FNA 97] *Fermi National Accelerator Laboratory, Batavia. Activity report 1997.*
Fermilab Batavia (1997)

[Fuk 98] Y. Fukuda *et al.* (Super-Kamiokande Kollaboration)
Evidence for oscillation of atmospheric neutrinos.
Phys. Rev. Lett. **81** (1998) 1562

[Ful 98] T. Fuljahn *et al.*
Concept of the First Level Trigger for HERA-B.
IEEE Trans. Nucl. Sci. **45** (1998) 1782

[Ful 99] T. Fuljahn
Aufbau und Charakterisierung des schnellen Kontrollsystems für das Experiment HERA-B.
Dissertation, Universität Hamburg (1999)

[Fri 57] J. Friedman und V. Telegdi
Nuclear Emulsion Evidence For Parity Nonconservation In The Decay Chain $\pi^+\mu^+e^+$.
Phys. Rev. **105** (1957) 1681

[Fri 97] S. Frixione, M. Mangano, P. Nason und R. Ridolfi
Heavy-quark production.
CERN-TH/97-16, hep-ph/9702287 (1997)

[Gar 57] R. L. Garwin, L. M. Ledermann und M. Weinrich
Observations Of The Failure Of Conservation Of Parity And Charge Conjugation In Meson Decays: The Magnetic Moment Of The Free Muon.
Phys. Rev. **105** (1957) 1415.

[GEA 94] CERN Application Software group
GEANT Detector Description and Simulation Tool.
CERN Program Library Long Writeup W5013 (1994)

[Geo 01] *Beschreibung der Geometrie-Version 99-08-11 des HERA-B Detektorsetups.*
`http://www-hera-b.desy.de//subgroup/software/geometry/geomvers.html #GEOM/VERS 0.0811 (2001)`

[Ger 98] E. Gerndt *et al.*
Description of Messages and Process Logic for the First Level Trigger of HERA-B.
FLT interne Veröffentlichung (1998)

[Ger 00] E. Gerndt
HERA-B Pretrigger and FLT Latency.
HERA-B Note 00-013 (2000)

[Gla 61] S. L. Glashow
Partial Symmetries Of Weak Interactions.
Nucl. Phys. **22** (1961) 579

[Gla 97] B. Glass
Analoge Auslese- und Triggerelektronik für Mikrostreifen-Gaszähler.
Diplomarbeit, Ruprecht-Karls-Universität Heidelberg (1997)

[Gra 01] W. Gradl
Private Mitteilung. (2001)

[Gru 96] C. Grupen
Particle Detectors.
Cambridge monographs on particle physics, nuclear physics and cosmology, Cambridge University Press, Cambridge (1996)

[Gua 88] M. Guanziroli *et al.* (NA10 Kollaboration)
Angular Distributions Of Muon Pairs Produced By Negative Pions On Deuterium And Tungsten.
Z. Phys. C **37** (1988) 545

[Har 95] E. Hartouni *et al.* (HERA-B Kollaboration)
HERA-B Design Report.
DESY-PRC 95/01 (1994)

[Hau 99] S. Hausmann
Das Auslesesystem der inneren Spurkammern bei HERA-B.
Dissertation, Ruprecht-Karls-Universität Heidelberg (1999)

[Har 98] P. F. Harrison *et al.*
The BaBar Physics Book, Physics at an Asymetric B Factory.
SLAC-R-504 (1998)

[HER 00] HERA-B Kollaboration
HERA-B. Report on status and prospects - October 2000.
DESY PRC 00/04 (2000)

[HER 00a] HERA-B Kollaboration
HERA-B Physics in 2001/2002.
HERA-B interne Veröffentlichung (2000)

[HER 01] HERA-B Kollaboration
Update of status and plans for 2001/2.
HERA-B interne Veröffentlichung (2001)

[Her 00a] J. Hernandez
Farming in HERA-B.
IEEE Nuclear Science Symposium, Lyon (2000)

[Hot 98] T. Hott
MSGC development for the Inner Tracker of HERA-B.
Nucl. Instr. and Meth. **A 408** (1998) 258

[Hul 01] W. Hulsbergen
Distribution of number of interactions in triggered events.
Private Mitteilung (2001)

[Iva 99] J. Ivarsson, P. Kreuzer und T. Lohse
PYTHIA and FRITIOF: Event Generators for HERA-B.
HERA-B Note 99-067 (1999)

[Igo 97] O. Igonkina, R. Spighi, M. Villa und A. Zoccoli
ECAL performances for J/ψ reconstruction.
HERA-B Note 97-150 (1997)

[Igo 00] O. Igonkina *et al.*
Online π^o calibration of ECAL.
HERA-B Note 00-103 (2000)

[Igo 01] O. Igonkina
Private Mitteilung. (2001)

[Jan 95] D. M. Jansen *et al.*
Measurement of the bottom quark production cross-section in 800-GeV/c proton - gold collisions.
Phys. Rev. Lett. **74** (1995) 3118

[Kal 60] R. E. Kalman
A New Approach to Linear Filtering and Prediction Problems.
Trans. ASME J. Basic Engineering (1960) 35

[Kal 61] R. E. Kalman und R. S. Bucy
New results in linear filtering and prediction theory.
ASME J. Basic Eng. **83** (1961) 95

[Kap 94] D. M. Kaplan
B cross-section from E789.
IIT-HEP-94-2 (1994)

[Kle 92] K. Kleinknecht
Detektoren für Teilchenstrahlung.
Teubner Studienbücher, 3. Auflage, Stuttgart (1992)

[Kom 00] N. Komin
Time Calibration of the Outer Tracker at HERA-B.
Diplomarbeit, Humboldt-Universität zu Berlin (2000)

[Kni 00] C. Knierim
Messung und Analyse von Ratenfluktuationen am HERA-B Target.
Diplomarbeit, Universität Dortmund (2000)

[Lam 78] C. S. Lam und W. Tung
Systematic Approach to Inclusive Lepton Pair Production in Hadronic Collisions.
Phys. Rev. D **18** (1978) 2447

[Lam 80] C. S. Lam und W. Tung
A Parton Model Relation Sans QCD Modifications In Lepton Pair Productions.
Phys. Rev. D **21** (1980) 2712

[Lan 98] M. Langer
Bestimmung der Beauty-Quantenzahl bei HERA-B mit Hilfe Neuronaler Netze.
Diplomarbeit, Humboldt-Universität zu Berlin (1998)

[Lan 01] S. Lanyov
Momentum resolution and magnet chambers.
Präsentation, Tracking Meeting, März 2001

[Lee 56] T. D. Lee und C. N. Yang
Question of Parity Conservation in Weak Interaction.
Phys. Rev. **104** (1956) 254

[Lei 00] M. J. Leitch *et al.*
Measurement of Differences between J/ψ and ψ' Suppression in p-A Collisions.
Phys. Rev. Lett. **84** (2000) 3256

[Loh 94] T. Lohse *et al.*
HERA-B. An Experiment to Study CP Violation in the B System Using an

Internal Target at the HERA Proton Ring. Proposal.
DESY-PRC 94/02 (1994)

[Loh 97] T. Lohse
Wire Target Geometry and Tagging Performance. HERA-B Note 97-085 (1997)

[Loh 98] T. Lohse
HERA-B: overview and engineering runs.
Nucl. Instr. and Meth, A **408** (1998) 258

[Mak 62] Z. Maki, M. Nakagawa und S. Sakata
Remarks On The Unified Model Of Elementary Particles.
Prog. Theor. Phys. **28** (1962) 870

[Man 97] R. Mankel
A concurrent track evolution algorithm for pattern recognition in the HERA-B main tracking system.
Nucl. Instr. and Meth, A **395** (1997) 169

[Med 95] M. Medinnis
HERA-B Triggering.
HERA-B Note 95-144 (1995)

[Med 97] M. Medinnis
Status Report: SLICER Performance.
HERA-B interne Veröffentlichung (1997)
`http://www-hera-b.desy.de/subgroup/slt/notes/slicer.ps`

[Nir 99] Y. Nir
CP Violation In and Beyond the Standard Model.
SLAC Summer Institute, Vorlesungsskript (1999)

[Noe 18] E. Noether
Invariante Variationsprobleme.
Nachrichten der Königlichen Gesellschaft der Wissenschaften Mathem.-physik. Klasse, Heft 2, Göttingen (1918) 235

[Nör 99] M. Nörenberg
Objektorientierte Simulation der Trigger Decision Unit des HERA-B First Level Triggers.
Diplomarbeit, Universität Hamburg (1999)

[Nör 01] M. Nörenberg
Private Mitteilung. (2001)

[Pi 92] H. Pi
An event generator for interactions between hadrons and nuclei: FRITIOF version 7.0.
Computer Physics Comm. **71** (1992) 173

[Per 98] R. Pernack
Untersuchungen von Gasmischungen mit Blick auf die im Spurkammersystem des HERA-B-Detektors erreichbare Effizienz und Auflösung.
Diplomarbeit, Universität Rostock (1998)

[Per 99] D. H. Perkins
Hochenergiephysik.
Addison-Wesley Deutschland, Bonn (1991)

[Rat 96] F. Radnikov
First Level Trigger. Track Kinematics Reconstruction.
HERA-B Note 96-200 (1996)

[Rat 01] F. Radnikov
Private Mitteilung. (2001)

[Ree 77] J. R. Rees (LBL-SLAC Joint PEP Group Kollaboration)
The Positron - Electron Project: PEP.
IEEE Trans. Nucl. Sci. **24** (1977) 1836

[Res 97] D. Ressing und R. Wurth
Implementation of the SLB using SHARC's.
HERA-B Interner Bericht (1997)

[Res 01] D. Ressing
Simulation of the FLT.
HERA-B Note 01-023 (2001)

[Rie 97] J. Rieling
Entwicklung eines Silizium-Vertex-Detektors für das HERA-B-Experiment.
Dissertation, Ruprecht-Karls-Universität Heidelberg (1997)

[Ros 98] J. L. Rosen
The HERA-B ring imaging Cherenkov detector.
Nucl. Instr. and Meth. **A 408** (1998) 191

[Saa 96] F. Saadi-Lüdemann
Trigger for Radiative B Decays at the HERA-B experiment.
HERA-B Note 96-246

[Sam 01] D. Samtleben
Messung der J/ψ-Produktion in Proton-Nukleon-Wechselwirkungen.
Dissertation, Universität Hamburg (2001)

[Sam 01a] D. Samtleben
Private Mitteilung. (2001)

[Sav 98] V. Saveliev
The HERA-B transition radiation detector.
Nucl. Instr. and Meth. **A 408** (1998) 191

[Sch 95] M. H. Schub *et al.* (E789 collab.)
Measurement of J/ψ and ψ' production in 800 GeV/c proton-gold collisions.
Phys. Rev. D **52** (1995) 1307

[Sch 98] S. Schaller
Untersuchung der Beiträge einzelner Protonenbündel zur Wechselwirkungsrate des HERA-B Experiments.
Diplomarbeit, Universität Heidelberg (1998)

[Sch 00] U. Schwanke
Trigger and Reconstruction Farms in the HERA-B Experiment and Algorithms for a Third Level Trigger.
Dissertation, Humboldt-Universität zu Berlin (2000)

[Seg 77] J. Seguinot und T. Ypsilantis
Photo-ionization and Cherenkov ring imaging.
Nucl. Instr. and Meth. **A 408** (1998) 289

[Sjö 94] T. Sjostrand
High-energy physics event generation with PYTHIA 5.7 and JETSET 7.4.
Comput. Phys. Commun. **82** (1994) 74

[Škr 99] D. Škrk
Calibration of the Ring Imaging Čerenkov Counter of the HERA-B Spectrometer.
Dissertation, University of Ljubljana (1999)

[Spr 00] S. Spratte
Bestimmung der Wechselwirkungsrate des HERA-B Targets und Untersuchung des Coasting Beam am HERA Protonen-Ring.
Dissertation, Universität Dortmund (2000)

[Sym 00] M. Symalla
Vorbereitende Untersuchungen zur Bestimmung der Wechselwirkungsraten und deren Zeitstruktur an einem Drahttarget mit Hilfe der Energieinformation des HERA-B elektromagnetischen Kalorimeters.
Diplomarbeit, Universität Dortmund (2000)

[Tar 96] E. Tarkovsky
The HERA-B electromagnetic calorimeter.
Nucl. Instr. and Meth. **A 379** (1996) 515

[Tho 96] J. Thom
Vorbereitung eines Experimentes zur Messung der $B_s^o\overline{B_s^o}$-Mischung bei HERA-B.
Diplomarbeit, Universität Hamburg (1996)

[Thu 96] H. Thurn
Status Report of Simulation Package for the Second Level Trigger of HERA-B.
HERA-B Note 96-250 (1996)

[Vil 97] M. Villa
The Reconstruction for the Electromagnetic Calorimeter of the HERA-B Experiment.
Proc. VII Intern. Conf. on Calor. in High Energy Phys., World Scient. (1997)

[Vil 97a] M. Villa
Progress report on the ECAL reconstruction software.
HERA-B Note 97-135 (1997)

[Vil 00] M. Villa
Electron tracks analysis.
HERA-B Note 00-150 (2000)

[Vil 01] M. Villa
Private Mitteilung. (März 2001)

[Wag 00] G. Wagner
Aufbau und Test der mit Digitalen-Signal-Prozessoren realisierten Komponenten des Datennahmesystems von HERA-B.
Dissertation, Universität Hamburg (2000)

[Wag 99] W. Wagner
Auswertung der Daten des HERA-B Vertexdetektors im Hinblick auf die physikalischen Eigenschaften der verwendeten Siliziumstreifenzähler.
Dissertation, Ludwig-Maximilian-Universität München (1999)

[Wei 67] S. Weinberg
A Model Of Leptons.
Phys. Rev. Lett. **19** (1967) 1264

[Wer 00] C. Werner
Untersuchungen zur Betriebssicherheit und zum Langzeitverhalten von GEM-MSGC Detektoren bei ihrem Einsatz in einem Hochratenexperiment.
Diplomarbeit, Ruprecht-Karls-Universität Heidelberg (2000)

[Wig 27] E. P. Wigner
Goett. Nachr. **375** (1927)

[Wol 83] L. Wolfenstein
Parametrization of the Kobayashi-Maskawa-Matrix.
Phys. Rev. Lett. **51** (1983) 1945

[Wu 57] C. S. Wu *et al.*
Experimental Test of Parity Conservation in Weak Interactions.
Phys. Rev. **104** (1957) 1413

[Zeu 93] ZEUS Kollaboration
The ZEUS Detector.
Status Report 1993, DESY-PRC 93/05

[Zoc 00] A. Zoccoli
The electromagnetic calorimeter of the HERA-B experiment.
Nucl. Instr. and Meth. A **446** (2000) 246

Abbildungsverzeichnis

Tabellenverzeichnis

Danksagung

Die vorliegende Promotion wurde innerhalb einer großen internationalen Kollaboration erstellt. Dementsprechend lebte sie auch von der täglichen Zusammenarbeit und dem Austausch von Ideen. Ich möchte mich deshalb an dieser Stelle gerne bei all denen bedanken, die zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen haben.
Zunächst einmal möchte ich mich gerne bei Dr. Andreas Schwarz für die Aufnahme in die DESY First Level Trigger Gruppe, die Aufgabenstellung und die Betreuung während der Entstehung dieser Arbeit bedanken. Gleichfalls möchte ich gerne meinem zweiten Betreuer, Prof. Dr. Walter Schmidt-Parzefall, für zahlreiche hilfreiche Diskussionen und die Übernahme des Zweitgutachtens danken.
Ich möchte mich weiterhin gerne ganz herzlich bei Dr. Klaus Ehret bedanken, durch dessen Betreuung, Anregungen und Hinweise diese Arbeit in den letzten Monaten wesentlich geformt wurde.
Als Mitglied der First Level Trigger Gruppe wäre die Arbeit sicherlich nicht so angenehm gewesen ohne das internationale Flair, die Zusammenarbeit und Unterstützung aller Kollegen dieser Gruppe, die neben der Physik auch Einblicke in die verschiedensten Nationalitäten ermöglichte: Ich möchte mich deshalb gerne bei Dr. Alexander Somov für viele hilfreiche Diskussionen bedanken, bei Dr. Andrea Michetti für die italienische Lebensart, Post- und Übersetzungsservice und die Unterstützung bei dem Hardwaretest des ECAL Pretriggers, bei Dr. Bernhard Schwingenheuer für Hilfe bei hardwaretechnischen Fragen, bei Christian Rothe für die schöne Zusammenarbeit, bei Dr. Dominik Reßing für viele wichtige Anregungen, Tips und Hinweise, bei Dr. Ekkehard Gerndt für die Unterstützung und Hinweise in vielfältiger Weise, bei Dr. Fedor Ratnikov für seine Einsichten in die russische Kultur genauso wie für all sein Wissen über den FLT, das er mir zukommen hat lassen, bei Holger Fleckenstein für zahlreiche Diskusssionen und Hilfestellungen insbesondere zur Track Finding Unit, bei Dr. Imma Riu für die Spanisch-Nachhilfe und die Unterstützung innerhalb des FLTs, bei Dr. Isabelle Negri für die Auffrischung meines Franzoesischkenntnisse genauso wie für viele wertvolle Hilfestellungen, bei Maarten Bruinsma für das schöne Amsterdamwochenende und für die vielen Hinweise zu Analysen im Allgemeinen und ROOT im Speziellen, bei Michael Nörenberg, unserem Nordlicht und Programmierguru, für die vielen Programmierhilfestellungen und seine große Hilfsbereitschaft, bei Robert Pernack und bei Dr. Vladimir Popov sowie bei meinen Mannheimer Kollegen Dr. Andreas Wurz, Dr. Joachim Gläß und Dr. Christian Hähnel für viele Hilfestellungen rund um die First Level Trigger Hardware.

Da das Kalorimeter und sein Pretrigger wohl eigentlich „russisch“ und „italienisch“ sprechen, möchte ich mich bei unserer italienischen Gruppe aus Bologna und unserer russischen Gruppe für die „Übersetzungen“ bedanken, insbesondere bei Dr. Marco Bruschi, Mr. Pretrigger, für die gute Zusammenarbeit und Unterstützung innerhalb des

ECAL Pretriggers, bei Dr. Mauro Villa, dem CARE Experten, für seine vielfältige Unterstützung und Hinweise zur Analyse, bei Olya Igonkina für die vielen Informationen rund ums Kalorimeter, bei Dr. Umberto Marconi für seine Unterstützung bei der Programmierung des Frameworks von *EcalSIM* sowie bei Vincenzo Vagnoni für die schöne Zusammenarbeit im Bereich der Lookuptables im Speziellen und im Pretrigger im Allgemeinen.

Für das Korrekturlesen meiner Arbeit bzw. Teilen der Arbeit und für die viele Mühe und die vielen wichtigen Hinweise möchte ich mich gerne bei Dr. Klaus Ehret, Dr. Dirk Krücker, Dr. Dominik Ressing, Dr. Dorothea Samtleben sowie Prof. Dr. Thomas Lohse, Dr. Bernhard Schwingenheuer und Meike Plehn bedanken.

Für ungezählte Diskussionen über Physik und die Welt, Grill- und Spieleabende und vieles mehr möchte ich mich gerne bei allen oben genannten sowie bei Dr. Andreas Gellrich, Brian Aagard Petersen, Dr. Christoph Borgmeier, Dr. Gregor Wagner, Dr. Jenny Ivarsson, Lars Sözuer, Dr. Markus Hohlmann, Martin Bräuer, Michael Symalla, Dr. Michael Medinnis, Dr. Peter Kreuzer, Natalia Ratnikova, Dr. Raoul Zimmermann, Dr. Selim Issever, Stefan Steinbeck, Dr. Thomas Fuljahn, Viktor Egorytchev sowie Wouter Hulsbergen bedanken.
Weiterhin möchte ich mich gerne ganz herzlich bei Dr. Timo Hauschild und Dr. Stephan Hurling bedanken, stellvertretend für all die Freunde, die mich von Anfang meines Studiums an begleitet haben, und die in letzter Zeit leider viel zu kurz gekommen sind.
Und schließlich möchte ich meinen herzlichsten Dank an meine Eltern für ihre vielfältige Unterstützung aussprechen, sowie last but not least an meine Freundin Meike, für ihre große Unterstützung, ihre Hilfe und ihr Verständnis, wenn auch für sie mal wieder viel zu wenig Zeit übrig blieb!

Euch allen sei recht herzlich gedankt !