

RUPRECHT-KARLS-UNIVERSITÄT HEIDELBERG



Jan-Paul Seidler

---

Synchronisationsstudien am ATLAS-Trigger

Diplomarbeit

HD-KIP 09-22

KIRCHHOFF-INSTITUT FÜR PHYSIK

---



# Synchronisationsstudien am ATLAS-Trigger

Die Diplomarbeit wurde ausgeführt von Jan-Paul Seidler am  
Kirchhoff-Institut für Physik  
unter der Betreuung von  
**Herrn Prof. Dr. H.C. Schultz-Coulon**



# Timing Studies for the ATLAS-Trigger

A signal chain with all channels working synchronously is essential for the stability and a precise energy measurement of the ATLAS Level-1 Calorimeter Trigger. This thesis develops and evaluates a method which allows to synchronize the approximately 7200 channels of the Calorimeter Trigger Pre-Processor system with a precision of nanoseconds. In an offline analysis a combined Gaussian and Landau function is fitted to the digital calorimeter signals to improve the timing of the digitization with respect to the analogue pulses. The method is verified to be working within the demanded precision of five nanoseconds in the whole calorimeter system by evaluating a delay calibration run, which uses a precise pulsing system to set a reference for ideal timing. The method is ready to be used on beam data.

## Synchronisationsstudien am ATLAS-Trigger

Die Synchronität der Kanäle des ATLAS-Kalorimeter-Triggers der ersten Stufe ist entscheidend sowohl für die stabile Arbeitsweise des Triggers, als auch für die präzise Energiemessung auf Triggerebene. In dieser Arbeit wird eine Methode entwickelt und evaluiert, die es ermöglicht, die etwa 7200 Kanäle des Pre-Prozessor-Systems des Triggers mit einer Präzision im Nanosekundenbereich zu synchronisieren. In einer Offline-Datenanalyse wird eine Kombination einer Gauss- und einer Landau-Funktion an digitale Kalorimetersignale angepasst, um den Zeitpunkt der Digitalisierung auf das Maximum der analogen Signale abzustimmen. Die Anwendbarkeit der Methode wird anhand von Kalibrationsruns verifiziert, bei denen Signale aus Pulsersystemen als Referenz für ideale Synchronität benutzt werden. Die Methode erreicht im gesamten Kalorimeter die Vorgabe der Präzision von fünf Nanosekunden und kann in der Inbetriebnahmephase auf Daten aus ersten Kollisionen angewendet werden.



# Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Einleitung</b>	<b>1</b>
<b>2</b>	<b>Physik an der TeV-Skala und das ATLAS-Experiment</b>	<b>3</b>
2.1	Das ATLAS-Experiment . . . . .	3
2.2	Das Standardmodell der Teilchenphysik . . . . .	12
2.3	Physik jenseits des Standardmodells . . . . .	17
<b>3</b>	<b>Das ATLAS-Trigger- und Datennahmesystem</b>	<b>19</b>
3.1	Der ATLAS-Trigger . . . . .	19
3.2	Die analoge Signalkette . . . . .	23
3.3	Der Kalorimeter-Trigger der ersten Stufe . . . . .	25
3.4	Das Pre-Prozessor-Modul . . . . .	32
<b>4</b>	<b>Datennahme und Datenrekonstruktion</b>	<b>37</b>
4.1	Kalibrationssysteme . . . . .	37
4.2	Kalibrationsruns . . . . .	40
4.3	Phos4-Signalrekonstruktion . . . . .	45
<b>5</b>	<b>Synchronisation des Kalorimeter Triggers</b>	<b>51</b>
5.1	Coarse- und Fine-Timing . . . . .	51
5.2	Motivation der Fit-Methode . . . . .	54
5.3	Simulationen zur Genauigkeit der Fit-Methode . . . . .	58
5.4	Validierung der Fit-Methode . . . . .	68

5.5 Anwendung der Fit-Methode im Commissioning . . . . .	83
<b>6 Zusammenfassung und Ausblick</b>	<b>87</b>
<b>Literaturverzeichnis</b>	<b>89</b>
<b>Danksagung</b>	<b>91</b>



# 1. Einleitung

Der Large Hadron Collider (LHC) wird derzeit am europäischen Kernforschungszentrum CERN bei Genf in Betrieb genommen. In dem Ringbeschleuniger mit einem Umfang von 27 km werden Protonen mit einer vorgesehenen Schwerpunktsenergie von  $\sqrt{s} = 14$  TeV zur Kollision gebracht. ATLAS<sup>1</sup> ist neben CMS<sup>2</sup>, ALICE<sup>3</sup> und LHCb<sup>4</sup> eines der vier großen Experimente, die derzeit für die Datennahme vorbereitet werden. CMS und ATLAS suchen als Universaldetektoren unter anderem nach dem Higgs-Boson und sogenannter „neuer Physik“, die über die bisherige Beschreibung der Teilchenphysik durch das Standardmodell hinausgeht.

Einige der vorhergesagten, zu untersuchenden Prozesse des seit den 1970er Jahren an immer hochenergetischeren Teilchenbeschleunigern erforschten Standardmodells besitzen nur sehr geringe Wirkungsquerschnitte. Die hohe Zahl der Proton-Proton-Reaktionen, die benötigt wird, um dennoch Aussagen über diese Physik treffen zu können, soll durch eine nominelle Luminosität von  $10^{34} \text{cm}^{-2} \text{s}^{-1}$  im voll ausgelasteten Betrieb des LHC gewährleistet werden. Allerdings muss, um die Leistungsfähigkeit der Datennahmesysteme nicht zu überfordern, eine Online-Selektierung der Ereignisse durch Trigger vorgenommen werden. Die Selektion und Reduktion der Ereignisse durch das Trigger- und Datennahmesystem des ATLAS-Experimentes von der Kollisionsrate der Protonenpakete von 40 MHz auf etwa 200 Hz Ausgangsrate geschieht in drei Stufen.

Der Pre-Prozessor des Kalorimeter-Triggers der ersten Stufe digitalisiert und prozessiert parallel etwa 7200 Kanäle des Kalorimeters im 40 MHz-Takt des LHC, um innerhalb von  $2.5 \mu\text{s}$  eine Triggerentscheidung fällen zu können. Das Pre-Prozessor-System aus programmierbarer Hardware bereitet die Signale der Kalorimeter vor, um durch nachfolgende Prozessoren bestimmte Ereignissignaturen identifizieren zu können. Aufgrund von unterschiedlichen Flugzeiten der Teilchen im Detektor und Laufzeiten in verschiedenen langen Kabeln erreichen die Kalorimetersignale derselben Kollision das Pre-Prozessorsystem mit Zeitunterschieden. Ein nicht ideal synchronisiertes System weist zudem eine Ungenauigkeit in der Energiemessung durch Digitalisierung der analogen Kalorimeterpulse außerhalb des Maximums auf. Im Rahmen dieser Arbeit wird eine Methode entwickelt und ausgewertet, die die Synchronisierung der Kanäle des Pre-Prozessor-Systems des Kalorimeter-Triggers der ersten Stufe

---

<sup>1</sup>A Toroidal LHC ApparatuS

<sup>2</sup>Compact Muon Solenoid

<sup>3</sup>A Large Ion Collider Experiment

<sup>4</sup>Large Hadron Collider beauty Experiment

mit Nanosekunden-Präzision ermöglicht.

Zurzeit, da keine Protonen im LHC beschleunigt werden, befindet sich der Detektor und auch das Level-1 Kalorimeter-Trigger Pre-Prozessor-System in der Inbetriebnahme-Phase. Eine Reihe von Testläufen steht für die Kalibration des Pre-Prozessors zur Verfügung, um die gewünschten Steuerparameter der Elektronik festzulegen oder zu überprüfen. Pulversysteme sind in der Lage, für Testzwecke synchrone Signale in den Kalorimetern zu erzeugen und ermöglichen so das Studium von Kalorimeterpulsen im gesamten Detektor. Für die stabile Arbeitsweise des Level-1 Triggers, bedarf es der Synchronisierung der 7200 Kanäle mit einer Präzision von wenigen Nanosekunden.

Diese Synchronisation kann durch Auswertung eines Delay-Scans, in dem die Referenz-Clock der Digitalisierung schrittweise um einzelne Nanosekunden gegenüber der Clock der Pulversysteme verzögert wird, hergestellt werden. Allerdings lässt sich mit dem erwähnten Delay-Scan keine synchrone Datennahme für den Kollisionsbetrieb herstellen, da die Pulversignale andere Zeitunterschiede zwischen den einzelnen Kanälen aufweisen. Gegen Ende 2008 wurde die Synchronisation des Kalorimeter-Triggers auf Nanosekunden-Präzision im laufenden Betrieb getestet und zeigt sich als wichtig für die zuverlässige Zuordnung der Ereignisse zur richtigen Strahlkreuzung. Der Hauptteil dieser Arbeit beschreibt daher eine alternative Methode, die sich Fits an die digitalen Kalorimetersignale bedient, um den Pre-Prozessor dennoch im Rahmen der Anforderungen auch mit Signalen aus Proton-Proton-Kollisionen synchronisieren zu können.

## 2. Physik an der TeV-Skala und das ATLAS-Experiment

### 2.1 Das ATLAS-Experiment

Das ATLAS-Experiment ist eines der vier großen Experimente am Large Hadron Collider (LHC) am CERN. Das Ziel ist es, Proton-Proton-Kollisionen bei einer Schwerpunktsenergie  $\sqrt{s} = 14 \text{ TeV}$  zu untersuchen. Alle  $25 \text{ ns}$ , also mit  $40 \text{ MHz}$ , werden Bündel (Eng.: Bunches) von  $10^{11}$  Protonen mit einer maximalen Luminosität von  $10^{34} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$  miteinander kollidieren. Pro Strahlkreuzung wird es gleichzeitig ca. 20 inelastische Stöße zwischen Protonen geben. Speicherte man jedes Ereignis führte dies zu einer Datenmenge von 1600 Terabytes pro Sekunde. Die Verarbeitung und Selektierung der Daten ist, mit der Konstruktion des Detektors, eine der Herausforderungen des ATLAS-Experimentes.

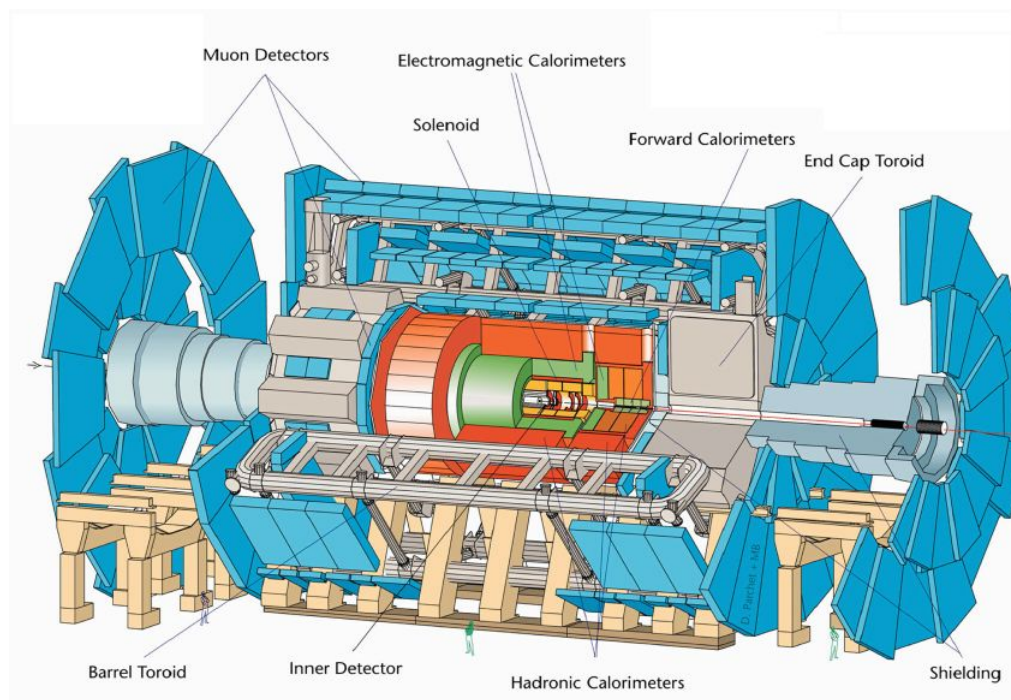


Abb. 2.1: Der ATLAS-Detektor [1]

Der ATLAS-Detektor [1] ist konstruiert als Universaldetektor zur Identifikation aller langlebigen Teilchen, die in den Proton-Proton-Kollisionen entstehen. Die Suche

nach dem Higgs-Teilchen, Signaturen "neuer Physik" und allgemein die Erforschung der Physik der Elementarteilchen aus Hadron-Kollisionen bei bisher unerreichten Schwerpunktsenergien stehen im Mittelpunkt des ATLAS-Experimentes.

Zudem werden in weiteren Experimenten Kerne schwerer Elemente wie Blei oder Gold bei Energien von 5.5 TeV pro Nukleon-Paar mit einer geplanten Luminosität von  $10^{27} \text{cm}^{-2} \text{s}^{-1}$  kollidiert. Dies ermöglicht es, stark wechselwirkende Materie bei hoher Energiedichte zu studieren. Insbesondere ein möglicher Phasenübergang zu einem quasifreien Zustand hadronischer Materie, dem Quark-Gluon-Plasma, sollen erforscht werden.

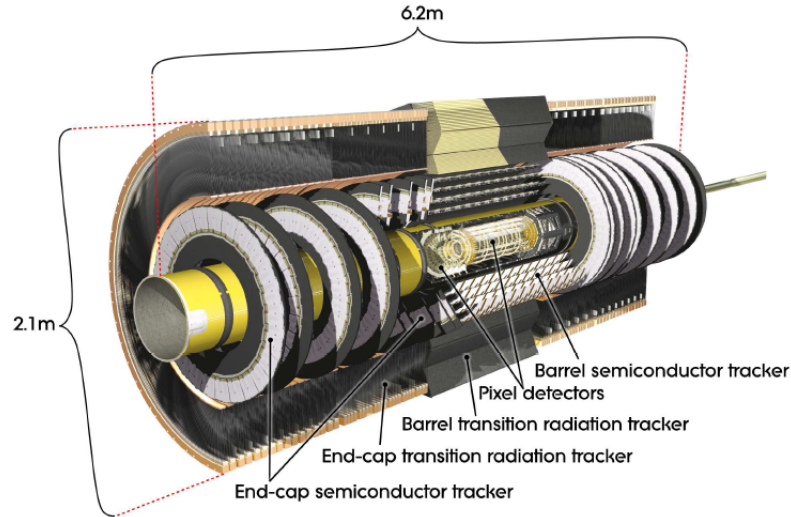
Die kleinen Wirkungsquerschnitte und die benötigte große Zahl an Proton-Proton-Reaktionen stellen besondere Anforderungen an das ATLAS-Experiment. Impulsauflösung geladener Teilchen, große Raumwinkelabdeckung, Kalorimetrie, Myon Identifikation, Strahlungshärte der Detektorelektronik als auch Selektion der Ereignisse durch Trigger sind wichtige Aspekte, die bei der Konstruktion des Detektors berücksichtigt werden müssen. Der ATLAS-Detektor besteht aus einem inneren Detektor, zwei Kalorimetern, Myondetektoren, zwei Magnetsystemen und einem dreistufigen Trigger- und Datennahmesystem.

Das im Folgenden verwendete Koordinatensystem, in dem der Detektor betrachtet wird, liegt mit der z-Achse parallel zur Strahlachse. Die x-y-Ebene steht senkrecht dazu. Man definiert  $r = \sqrt{x^2 + y^2}$ , den Abstand in transversaler Richtung zu z. Der Azimutwinkel  $0 < \phi < 2\pi$  sowie die Pseudorapidität  $\eta = -\ln \tan \frac{\theta}{2}$ , wobei  $0 < \theta < \pi$  der Polarwinkel ist, sind die üblichen Koordinaten, in denen z.B. Projektionen der Kalorimeter angegeben werden. Die Detektorhälfte positiver z-Werte wird als A-Seite, die negativer z-Werte als C-Seite bezeichnet. Desweiteren verwendet man den transversalen Impuls  $p_T$  und die transversale Energie  $E_T$ , die Projektionen von Impuls und Energie auf die Transversalebene zur Strahlachse, um die Kinematik der Streuprodukte im Detektor zu beschreiben. Die Summe der Transversalimpulse aller an einem Ereignis beteiligter Teilchen in den Kollisionen muss sich aufheben. Die longitudinalen Impulsanteile heben sich aufgrund der unterschiedlichen Teilimpulse der Proton-Partonen nicht auf.

## Der innere Detektor

Der ATLAS-Detektor wird bei maximaler Luminosität pro Strahlkreuzung, also alle 25 ns, ca. 1000 Teilchen detektieren. Zur präzisen Impulsmessung und Vertexidentifikation ist es unablässig, geladene Streuprodukte nah am Vertex mit feiner Auflösung zu detektieren sowie deren Spuren zu rekonstruieren. Die Nähe zum Kollisionspunkt sorgt für starke Anforderungen an Strahlungshärte der Komponenten über den geplanten 6-jährigen Betrieb des Inneren Detektors. Die dafür bestimmten Detektoren

sind im inneren Detektor (ID) zusammengefasst. In Abbildung 2.2 ist der ID skizziert.



**Abb. 2.2:** Aufbau des inneren Detektors [1]

Der ID misst Impulse, Primär- und Sekundärvertices geladener Teilchen mit  $p_T > 0.5 \text{ GeV}$  für Pseudorapiditäten  $\eta < 2.5$ . Elektronen können bis zu Impulsen von  $150 \text{ GeV}$  identifiziert werden.

**Der Pixeldetektor** ist der innerste Bestandteil des ATLAS-Detektors. Er besteht aus drei Schichten von mit Sauerstoff angereicherten Siliziumsensoren (Eng.: Pixel-Sensors) in Abständen von  $r = 50.5 \text{ mm}$ ,  $88.5 \text{ mm}$  und  $122.5 \text{ mm}$  um den Kollisionspunkt. Die Vorwärtsrichtung wird durch drei Lagen Sensoren senkrecht zur Strahlachse in etwa  $50 \text{ cm}$  Abstand zum Kollisionspunkt abgedeckt. Die innerste Schicht des zentralen Pixeldetektors wird Teilchenströmen, durch Photonen über  $30 \text{ keV}$  von über  $45 \text{ MHz/cm}^2$  oder durch Pionen über  $10 \text{ MeV}$  von etwa  $30 \text{ MHz/cm}^2$  ausgesetzt. Bei einer Fläche von  $19 \times 63 \text{ mm}^2$  und einer Dicke von  $250 \mu\text{m}$ , trägt jeder der  $1744$  Sensoren  $47232$  Pixel. Pulse durch Elektron-Loch-Paar-Erzeugung im Halbleitermaterial sorgen für eine räumliche Auflösung von unter  $5 \mu\text{m}$  in der Ebene der Module und etwa  $15 \mu\text{m}$  in der Ebene senkrecht dazu.

**Der Silizium Spurendetektor** (Eng.: SemiConductor Tracker) (SCT) bildet die nächste Stufe des ID. Er besteht aus  $4088$  Modulen aus Silizium-Mikrostreifen, die in  $4$  Schichten zylinderförmig umeinander und die Strahlachse angeordnet sind. Die Radien liegen zwischen  $r = 30 \text{ cm}$  und  $51 \text{ cm}$ . Zudem gibt es zwei scheibenförmige Endkappen, die Trajektorien im Bereich bis  $|\eta| < 2.5$  detektieren. Für die Sensoren des SCT wurde ein Halbleitermaterial verwendet, welches ebenfalls Signale durch

Erzeugung von Elektron-Loch-Paaren produziert. Der SCT erreicht Auflösungen von  $17 \mu\text{m}$  in der  $r - \phi$  Ebene sowie  $580 \mu\text{m}$  in  $z$  und  $r$ .

**Der Übergangsstrahlungs-Detektor** oder auch Transition Radiation Tracker (TRT) bildet mit  $54 \text{ cm} < r < 108 \text{ cm}$  den äußersten Spurendetektor des ID des ATLAS-Experimentes. Er besteht aus 73 Lagen der 4mm durchmessenden Drift Röhren (Eng.: Straw-Tubes) aus Polyimid, die von Schichten aus Aluminium und Graphit als Radiatoren stabilisiert werden. In den Endkappen befinden sich 160 Schichten solcher Röhren. In den Röhren befindet sich ein Gasgemisch aus Xe (70 %),  $\text{CO}_2$  (27 %) und  $\text{O}_2$  (3 %), welches die niederenergetischen Übergangsstrahlungsphotonen absorbiert und Ladungspulse an die Elektroden leitet. Die Photonen der Übergangsstrahlung stammen aus Cherenkov-Strahlung, die hier von geladenen Teilchen emittiert wird, die Medien mit unterschiedlichen Dielektrizitätskonstanten, also hier das Gas und die Röhren, durchqueren. Der TRT erreicht eine Ortsauflösung von  $130 \mu\text{m}$ .

## Das Kalorimetersystem

Um die Energien von möglichst vielen der gestreuten Teilchen genau bestimmen zu können, bedarf es eines Kalorimetersystems, welches in einem großen Raumwinkel nahezu alle Teilchen vollständig abbremst und die deponierte Energie misst. Im zentralen Bereich besitzt das elektromagnetischen Kalorimeter eine Tiefe von über 22 Strahlungslängen  $X_0$ . Das hadronische Kalorimeter weist 7.4 Wechselwirkungslängen  $\lambda$  auf. Abbildung 2.3 zeigt einen Schnitt durch das Kalorimetersystem.

**Das elektromagnetische Kalorimeter** (EM Kal.) befindet sich zwischen dem Inneren Detektor und dem hadronischen Kalorimeter. Die zentrale Region  $|\eta| < 1.475$ , bezeichnet man als Barrel (Eng.: Fass) (EMB) und hat eine Länge von 6.4 m. Das EMB besitzt einen inneren Radius von 1.5 m und einen äußeren von ca. 2 m. Außen schließen sich die Endkappen oder End-Cap Kalorimeter (EMEC) ( $1.375 < |\eta| < 3.2$ ) an. Sowohl EMB, als auch EMEC sind in drei Schichten aufgeteilt. Blei als Absorbermaterial und flüssiges Argon (LAr) als aktives Medium zwischen den Elektroden sind in allen Schichten akkordeon-artig angeordnet (siehe Abb. 2.4). Geladene Teilchen, die das Kalorimeter durchqueren, ionisieren das Argon, welches im flüssigen Zustand eine Ionisationsenergie von 24 eV aufweist. Die an den Elektroden gemessenen Ladungsschauer werden dann in deponierte Energie übersetzt.

Die Energieauflösung des elektromagnetischen Kalorimeters beträgt:  $\sigma_E/E = 10\%/\sqrt{E} \oplus 0.7\%$  mit  $E$  in GeV. In dem Term  $\frac{a}{\sqrt{E}} \oplus b$  entspricht  $a$  der stochastischen Ungenauigkeit,  $b$  entspricht dem Fehler durch lokales, nicht uniformes Verhalten des Detektors. Die Zellen des LAr-Kalorimeters können Energiedepositionen von bis zu 3 TeV als Maximum pro Zelle mit einem thermischem Rauschen von ca. 10 MeV

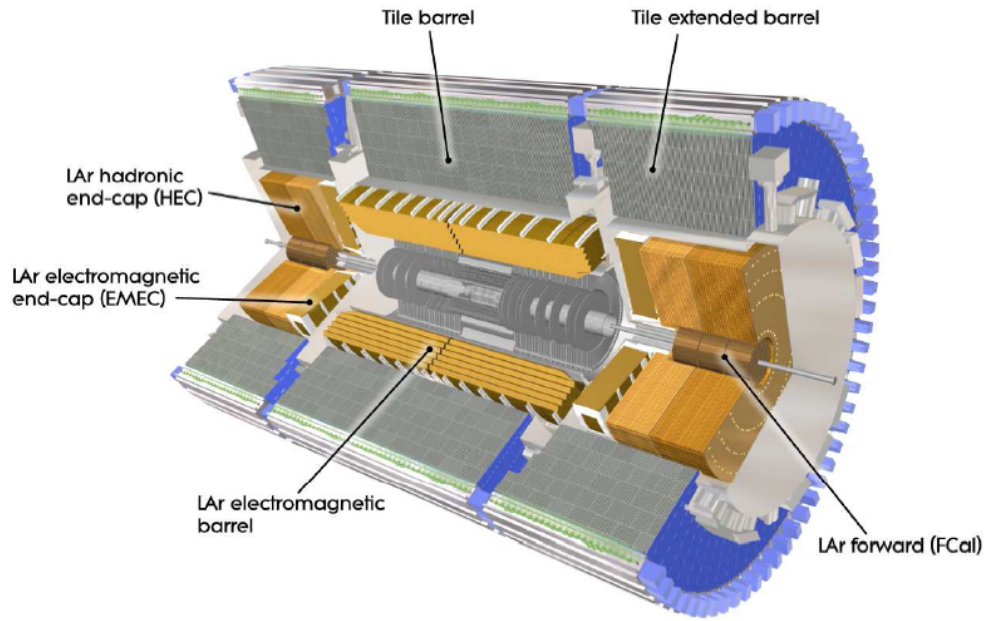


Abb. 2.3: Ansicht des ATLAS Kalorimetersystems [1]

auflösen.

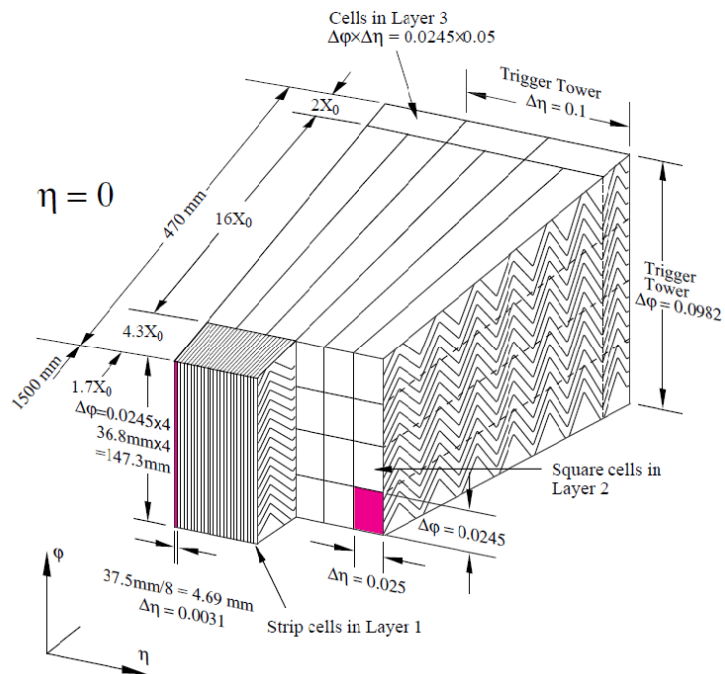


Abb. 2.4: Zellstruktur des zentralen EM LAr-Kalorimeters [1]

Abbildung 2.4 zeigt einen Schnitt durch die Schichten des LAr-Kalorimeters in der zentralen Region. Man erkennt die Raumwinkelbereiche der Kalorimeterzellen in  $\eta$ - $\phi$ , nahe bei  $\eta = 0$ . Außerdem ist ein Triggerelement, wie sie dem Kalorimeter-Trigger der ersten Stufe zugeordnet sind, mit  $\Delta\eta \times \Delta\phi = 0.1 \times 0.1$  zu sehen. Die Zellgrößen variieren von der innersten Schicht mit  $\Delta\eta \times \Delta\phi = 0.0031 \times 0.098$  mit 4.3 Strahlungslängen  $X_0$  über  $0.025 \times 0.0245$  in der zweiten Schicht mit  $16 X_0$  bis zu  $0.1 \times 0.0982$  in der äußersten mit  $2 X_0$ .

**Das hadronische Kalorimeter** liegt außerhalb des EM-Kalorimeters. Die zentral gelegenen Teile, das Barrel (LBA) ( $|\eta| < 1.0$ ) und das Extended Barrel (EBA) ( $0.8 < |\eta| < 1.7$ ), sind aus Eisen als Absorber zwischen ziegelförmigen (Eng.: tile = Ziegel) Szintillator-Platten aufgebaut. Aufgrund der Anordnung der Szintillatoren wird es oft auch als Tile-Kalorimeter bezeichnet. Es erstreckt sich in zwei Teilen über eine Länge von 5.8 m (LBA) und je 2.6 m (EBA) Länge der erweiterten Barrel-Bereiche mit einem inneren und einem äußeren Radius von 2.28 m bzw. 4.25 m. Auch das Tile-Kalorimeter ist in drei Schichten von etwa 1.5, 4.1 und 1.8 Wechselwirkungslängen  $\lambda$  aufgeteilt. Die inneren beiden besitzen Zellgrößen von  $\Delta\eta \times \Delta\phi = 0.1 \times 0.1$ , die äußere  $\Delta\eta \times \Delta\phi = 0.2 \times 0.1$ . Das Tile-Kalorimeter besitzt nur einige Tausend Zellen, wohingegen das LAr-Kalorimeter, allerdings mit dem elektromagnetischen Bereich zusammen, etwa 180000 Zellen aufweist.

Angrenzend, in dem Bereich von  $1.5 < |\eta| < 3.2$ , liegt die Endkappe des hadronischen Kalorimeters (HEC), welche auf einer Kupfer-/LAr Technologie basiert. Bestehend aus vier das Strahlrohr umfassenden Rädern, schliesst es sich außen an die restlichen Kalorimeter an. Die Zellgröße im HEC liegt bei  $\Delta\eta \times \Delta\phi = 0.1 \times 0.1$  für  $|\eta| < 2.5$  und  $\Delta\eta \times \Delta\phi = 0.2 \times 0.2$  für größere Werte von  $\eta$ . Für das Barrel und das HEC sind die Spezifikationen für den Fehler der Energiemessung:  $\sigma_E/E = 50 \%/ \sqrt{E} \oplus 3 \%$  mit E in GeV.

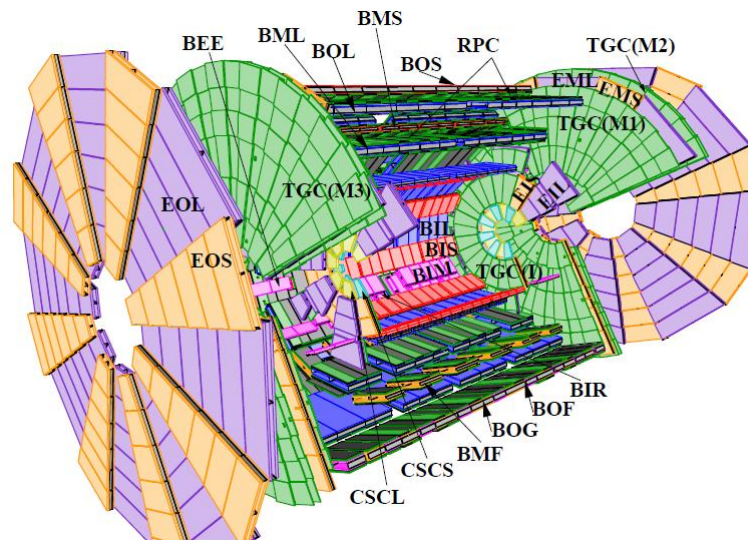
Um auch schwach transversal gestreute Teilchen detektieren zu können existiert im Bereich  $3.1 < |\eta| < 4.9$  das Vorwärts-Kalorimeter oder Forward Calorimeter (FCal), welches sich zwischen dem HEC und dem Strahlrohr einfügt. Das FCal ist in drei Module aufgeteilt, von denen das innerste dem EM-Kalorimeter und die beiden äußeren dem hadronischen Kalorimeter zugeordnet wird. In allen drei Modulen werden Signale durch Ionisation des LAr als aktives Material erzeugt, wobei im innersten Kupfer und in den beiden anderen Wolfram als Absorbermaterial verwendet wird. Die Präzision der Energiemessung im FCal beträgt  $\sigma_E/E = 100 \%/ \sqrt{E} \oplus 10 \%$ , mit der Energie E in GeV.



## Myon Detektor

Als minimal ionisierende Teilchen mit hoher Lebensdauer sind Myonen die einzigen Teilchen<sup>1</sup>, welche in großer Zahl die Kalorimeter durchdringen. Das Myonsystem bildet den äußersten Teil des Detektors. Im zentralen Bereich (Barrel) befinden sich drei zylinderförmige Schalen mit Radien von ungefähr 5 m, 7.5 m und 10 m Ausmaß. In Vorwärtsrichtung besteht das Myonsystem aus großen Rädern.

Das Myonsystem nutzt die Krümmung der Myonbahnen im Magnetfeld aus, um das Ladungsvorzeichen und die Transversalimpulse der Myonen zu messen. Die Myonbahn wird aus den Durchstoßpunkten der Myonen mit den Lagen des Myonsystems rekonstruiert. Es ist  $\sigma_{p_T}/p_T = 10\%$  bei einem Transversalimpuls von  $p_T = 1\text{ TeV}$  als zu erreichende Auflösung vorgegeben.



**Abb. 2.5:** Aufbau des Myonsystems [1]

Das Myon-System ist aus 4 Subsystemen zusammengesetzt.

**Driftröhren**, die sogenannten Monitored Drift Tube chambers (MDTs) erreichen in der Region  $|\eta| < 2$  eine Ortsauflösung von  $35\mu\text{m}$ . Die etwa 1100 MDTs, bestehend aus drei bis acht Driftröhren, decken eine Oberfläche von  $5500\text{m}^2$  ab. Die Driftröhren haben ca. 30 mm Durchmesser und sind mit einem  $\text{Ar}/\text{CO}_2$  Gasmischung von 93:7 bei einem Druck von 3 bar gefüllt. Myonen ionisieren das Gasmischung und lösen eine Elektronenlawine aus, die zum Anodendraht in der Mitte der Röhre wandert und dort als Ladungspuls registriert wird. Die Flugzeit der Lawine von bis zu 700 ns gehorcht einer nichtlinearen Beziehung und verschlechtert so eine sonst mögliche

<sup>1</sup>abgesehen von Neutrinos

Ortsauflösung. Allerdings weist sie ein gutes Alterungsverhalten gegenüber anderen Mischungen mit linearen Flugzeiten auf.

**Kathodenstreifen-Kammern** (Cathode Strip Chambers (CSC)) ersetzen das System aus MDTs in Vorwärtsrichtung  $2 < |\eta| < 2.7$  in der innersten Schicht. Sie sind Vieldrahtproportionalzähler, die in einer großen und einer kleinen Variante existieren. Beide sind mit 250 - 400 Anodendrähten in jeder der vier Drahtebenen ausgestattet, die entlang der Krümmungsebene der Teilchen gespannt sind. Sie erlauben Zählraten bis zu  $1 \text{ kHz/cm}^2$ , im Gegensatz zu den MDTs, die sicheren Betrieb nur bis  $150 \text{ Hz/cm}^2$  gestatten. Die veränderte Gasmischung aus  $\text{Ar}/\text{CO}_2$  80:20 und die verkürzte Flugzeit der Elektronen von nur 40 ns führen auf eine Zeitauflösung von 7 ns. Die CSCs erreichen eine Ortsauflösung von  $40 \mu\text{m}$ .

Damit das Myonsystem zu Triggerentscheidungen auf der ersten Stufe beitragen kann, benötigt es schnelle Spurrekonstruktion. Außerdem muss die Strahlkreuzung identifiziert werden, aus der die Myonen stammen und der Impuls derselben abgeschätzt werden.

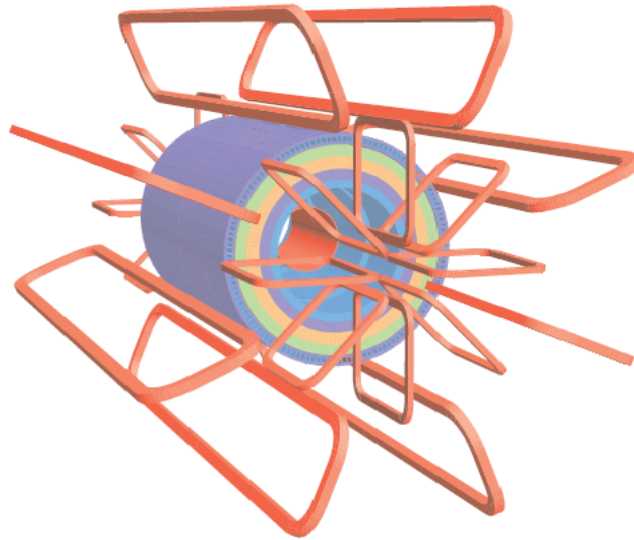
**Widerstandsplattenkammern**, die im Englischen als Resistive Plate Chambers (RPC) bezeichneten Myondetektoren sind in der zentralen Region  $|\eta| < 1.05$  in drei Zylindern konzentrisch um die Strahlachse installiert. Sie bestehen aus zwei Laminateplatten, zwischen denen im Abstand von 2 mm ein E-Feld von  $4.9 \text{ kV/mm}$  anliegt. Signale koppeln kapazitiv an metallische Streifen außerhalb der Platten und werden so ausgelesen. Eine Ortsauflösung von 10 mm bei einer Zeitauflösung von 1.5 ns wird erreicht. Es können Raten bis zu  $1 \text{ kHz/cm}^2$  im stabilen Betrieb bewältigt werden. Damit eine Triggerentscheidung durch niederenergetische Myonen ausgelöst wird, müssen zwei Treffer der inneren RPC-Lagen vorliegen. Ein Myon wird als hochenergetisch durch den Trigger eingestuft, wenn zusätzlich ein Treffer in der dritten Lage registriert wird.

**Hohlraum Kammern**, oder Thin Gap Chambers (TGC), befinden sich für schnelle Spurrekonstruktion in 4 Rädern in den Enkappenregionen  $1.05 < |\eta| < 2.4$ . Die innersten TGCs liegen bei  $z \approx 7 \text{ m}$ , die anderen drei nah am zweiten MDT-Rad liegen zwischen  $z = 12 - 15 \text{ m}$ . TGCs sind ebenfalls Vieldrahtproportionalkammern, die mit einem  $\text{CO}_2$ ,  $\text{C}_5\text{H}_{12}$  (55:45) Gasgemisch gefüllt sind. Sie erreichen eine räumliche Auflösung von 2-6 mm in  $r$ , 3-7 mm in  $\phi$  und eine zeitliche Auflösung von 4 ns.

## Magnetsysteme

In großen Teilchendetektoren werden die Trajektorien geladener Teilchen durch starke Magnetfelder gekrümmt, um die 4er Impulse der Teilchen bestimmen zu können. Das magnetische Feld des ATLAS-Detektors wird von zwei supraleitenden Magnet-

systemen (siehe Abb. 2.6) generiert. Es durchzieht den Detektor in der zentralen und Endkappen-Region, mit einem Durchmesser von 22 m und 26 m Länge. Das gesamte Magnetsystem wird mit flüssigem Helium auf 4.5 K Betriebstemperatur gekühlt. Um die Krümmung der Trajektorien auf einige Tausendstel genau bestimmen zu können bedarf es genauer Kenntnis des Magnetfeldes, welches permanent mit etwa 1800 Hall Sonden gemessen wird.



**Abb. 2.6:** Schematische Anordnung der Magnete [1]

Im inneren Detektor erzeugt eine Zylinderspule (Eng.: Solenoid) ein Magnetfeld parallel zur  $z$ -Achse, welches eine Stärke von 2 T erreicht. Das Eisen des Tile-Kalorimeters fungiert als Joch und führt die Magnetfeldlinien zurück. Das Material der einlagig mit 1154 Windungen gewickelten Spule ist eine Aluminium verstärkte Mischung aus Cu, Nb und Ti. Der Solenoid wird mit einem Strom von 7.73 kA betrieben.

Die äußeren Bereiche des Detektors erhalten ihr Magnetfeld von drei Konstruktionen aus je acht Toroid-Spulen, die sich drehsymmetrisch mit  $45^\circ$  in  $\phi$  anordnen (siehe Abb. 2.6). Der größte dieser Toroid-Magnete (Barrel Toroid) umfasst die Zylinderspule im zentralen Bereich. Die weiteren zwei befinden sich in den Regionen der Endkappen (End-Cap Toroids). Sie sind um  $22.5^\circ$  gegenüber dem zentralen Toroid-Magneten gedreht. Die Magnetfeldlinien laufen etwa Kreisförmig um die Strahlachse durch die Toroide. Das Magnetfeld im Myonsystem liegt zwischen 0.5 T im zentralen Bereich und bis zu 1 T in den Endkappen. Wie im Solenoid, bildet eine Mischung aus Al, Cu, Nb, Ti das supraleitende Material der Spulen, die mit Strömen von 20.5 kA betrieben werden.

## Das Trigger- und Datennahmesystem

Pro Kreuzung der Proton-Bündel werden im ATLAS-Experiment ca. 20 inelastische Stöße zwischen Protonen stattfinden, die zu weiteren Streuprodukten führen. Die Detektordaten eines Ereignisses kosten etwa 1.5 MB Speicherplatz. Vierzig Millionen Strahlkreuzungen pro Sekunde übersteigen die Schreibgeschwindigkeit heutiger Datennahmesysteme bei weitem und führten auf Datenmengen, die nach wenigen Tagen alle Speicherkapazitäten aufgebraucht hätten. Um die Leistungsfähigkeit der Datennahmesysteme nicht zu überfordern, muss die Zahl der Ereignisse bereits vor der Datennahme online reduziert und selektiert werden. Im ATLAS-Experiment geschieht dies durch ein Triggersystem in drei Stufen.

Die erste Stufe des Triggers (Level-1 (L1)) reduziert die Ereignisrate von 40 MHz auf 75 kHz. Es werden in der ersten Stufe ausschließlich inklusive Kriterien, wie Energie über einem Schwellwert, zur Selektion der Ereignisse verwendet. Bis eine Triggerentscheidung auf erster Stufe getroffen wird, werden die Daten in der Detektorelektronik des Datennahmesystems oder Data Acquisition Systems (DAQ) gepuffert. Erst dann werden die Daten an den High Level Trigger (HLT), der die zweite und dritte Stufe beinhaltet, weitergegeben. Die zweite Stufe (L2) lässt eine Ausgangsrate bis 3.5 kHz zu. Vollständige Rekonstruktion von Triggerobjekten wie Elektron oder Tau-Kandidaten geschieht im sogenannten Event Filter (EF), der dritten Stufe des Triggers, die die Rate auf 200 Hz reduziert. Eine detailliertere Beschreibung des Trigger Systems findet sich in Kapitel 3.

## 2.2 Das Standardmodell der Teilchenphysik

Das Standardmodell (SM) ist die gegenwärtige Beschreibung der fundamentalen Elementarteilchen und ihrer Wechselwirkungen. Es beinhaltet die starke, die schwache und die elektromagnetische Wechselwirkung als Eichgruppe  $SU(3)_C \times SU(2)_L \times U(1)_Y$  einer relativistisch invarianten Quantenfeldtheorie. Die Gravitation ist nicht enthalten, da sie zu schwach auf niedrigen Energieskalen ist, um an den existierenden Beschleunigern erforscht zu werden.

Dieser Teil gibt zunächst einen Überblick über das Standardmodell. Anschließend wird kurz der Higgs-Mechanismus als Teil des SM motiviert.

### Das Standardmodell

Das Standardmodell beschreibt und gliedert die elementaren Bestandteile der Materie durch Punktteilchen mit gewissen Symmetrien, welche mit Erhaltungsgrößen verbunden sind. Es gliedert die Teilchen in Spin  $\frac{1}{2}$  Fermionen, die virtuelle Eichbosonen

mit Spin 1 austauschen und so wechselwirken. Die Eichbosonen (siehe Tabelle 2.1) bewirken in der Theorie die Invarianz der Feldgleichungen unter lokalen Eichtransformationen, können aber auch als reale Teilchen auftreten. Um die Erzeugung massiver Eichbosonen zu erklären (siehe Abschnitt 2.2), wird die elektroschwache Wechselwirkung spontan in ihrer Symmetrie gebrochen. Als Nebenprodukt entsteht dabei das massive Higgs-Boson, welches als einziges skalares Teilchen mit Spin 0 bisher vom Standardmodell nur postuliert wird. Zu jedem Teilchen existiert außerdem ein Antiteilchen entgegengesetzter Quantenzahlen mit identischer Masse.

Boson	Wechselwirkung	Ruhemasse [GeV]	Koppelt an
$\gamma$	EM	0	Ladung
$Z^0, W^\pm$	Schwache WW	93, 82	Schwacher Isospin
g	Starke WW	0	Farbladung

**Tab. 2.1:** Die Bosonen der verschiedenen Wechselwirkungen

In jeder der drei Wechselwirkungen entsteht durch Eichsymmetrie der Feldgleichungen eine erhaltene Größe. Die EM-Wechselwirkung oder Quantenelektrodynamik (QED) ist invariant unter Transformationen der  $U(1)_{em}$ . Daher ist die Ladung  $Q$  erhalten. In der QED ist das  $U(1)_{em}$  Eichfeld mit dem masselosen Photon zu identifizieren.

Die schwache Wechselwirkung ist eichinvariant unter der  $SU(2)_L$  und erhält so den schwachen Isospin  $T$ . Es treten hier drei massive Eichbosonen auf, das  $W^+$ , das  $W^-$  und das  $Z^0$ , deren Massen allerdings erst im Rahmen der elektroschwachen Vereinigung durch spontane Symmetriebrechung der Symmetriegruppe  $SU(2)_L \times U(1)_Y \rightarrow U(1)_{em}$  erklärt werden kann. Diese erhält die schwache Hyperladung  $Y = Q - T_3$ .

Die starke Wechselwirkung tritt invariant unter Transformationen der  $SU(3)_C$  auf. Die entstehende Erhaltungsgröße bezeichnet man als Farbladung, die entsprechend der Eichgruppe in drei verschiedenen Formen auftritt, die als rot, grün und blau bezeichnet werden. Antiteilchen besitzen Antifarbe (antirrot, usw.). Die Eichbosonen, die die starke Wechselwirkung vermitteln, bezeichnet man als Gluonen  $g$ . Diese sind massenlos, tragen sowohl Farbe als auch Antifarbe und bilden aufgrund der Zahl der infinitesimalen Generatoren der Eichgruppe ein Oktett. Die Theorie der starken Wechselwirkung wird als Quantenchromodynamik, kurz QCD bezeichnet.

Die Fermionen gliedern sich in zwei Gruppen: Die erste Gruppe wird von den Leptonen gebildet, die in Tabelle 2.2 angegeben sind. Dies sind diejenigen Fermionen, die nicht der starken Wechselwirkung unterliegen. Die geladenen, wie auch die ungeladenen erscheinen in drei Familien, die außerdem als rechtshändige Singulettts oder

linkshändige Dubletts des schwachen Isospins  $T$  auftreten. Die Anzahl der Leptonen minus der Anzahl der Antileptonen ist eine Erhaltungsgröße.

Es gibt drei geladene Leptonen, das Elektron  $e$ , das Myon  $\mu$  und das Tau  $\tau$ . Drei weitere ungeladene Teilchen werden wegen der nur schwachen Wechselwirkung mit Materie Neutrinos genannt und mit je einem der geladenen Leptonen assoziiert. Es gibt das Elektron-Neutrino  $\nu_e$ , das Myon-Neutrino  $\nu_\mu$  und das Tau-Neutrino  $\nu_\tau$ . Sie sind die linkshändigen Partner der geladenen linkshändigen Leptonen und bilden Dubletts des schwachen Isospins  $T$ . Rechtshändige Neutrinos sind nicht im SM enthalten.

	I	II	III	Q	$T_3$	Y
linkshändig	$e_L$	$\mu_L$	$\tau_L$	-1	$-\frac{1}{2}$	$-\frac{1}{2}$
	$\nu_e$	$\nu_\mu$	$\nu_\tau$	0	$\frac{1}{2}$	$-\frac{1}{2}$
rechtshändig	$e_R$	$\mu_R$	$\tau_R$	-1	0	-1

**Tab. 2.2:** Leptonen der Familien I-III im Standardmodell. Die Quantenzahlen der Ladung  $Q$ , der dritten Komponente des Isospins  $T_3$  und die Hyperladung  $Y$  sind explizit angegeben.

Die zweite Gruppe von Fermionen bilden die Quarks. Es existieren 6 bekannte Quarks, die alle in Vielfachen von Dritteln der Elektronenladung  $e$  elektrisch geladen sind. Sie erscheinen in jeweils drei Farbladungen. Man bezeichnet sie als up- ( $u$ ), down- ( $d$ ), strange- ( $s$ ), charm- ( $c$ ), bottom- ( $b$ ) und das top-Quark ( $t$ ). Sie werden in 3 Familien von linkshändigen Dubletts bzw. rechtshändigen Singulets des schwachen Isospins angeordnet, wie in Tabelle 2.3 zu sehen ist. Zu den Quarks existiert jeweils eine gleichnamige Größe, die als Flavour bezeichnet wird und die von der starken Wechselwirkung nicht verletzt wird. Allerdings kann der Flavour durch geladene schwache Ströme durch den Austausch von  $W$ -Bosonen verletzt werden.

	I	II	III	Q	$T_3$	Y
linkshändig	$u_L$	$c_L$	$t_L$	$\frac{2}{3}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{6}$
	$d_L$	$s_L$	$b_L$	$-\frac{1}{3}$	$-\frac{1}{2}$	$\frac{1}{6}$
rechtshändig	$u_R$	$c_R$	$t_R$	$\frac{2}{3}$	0	$\frac{2}{3}$
	$d_R$	$s_R$	$b_R$	$-\frac{1}{3}$	0	$-\frac{1}{3}$

**Tab. 2.3:** Quarks im Standardmodell

Eine Besonderheit der starken Wechselwirkung ist, dass das Potential zwischen zwei Farbladung tragenden Teilchen so groß werden kann, dass neue Teilchen produziert werden. Daher treten Quarks und Gluonen niemals als freie Teilchen auf,

sondern nur als Konstituenten größerer farbneutraler Gebilde. Entfernen sich farbige Objekte voneinander, so entstehen neue Teilchen, die die Farbladung nach außen abschirmen. Die Entstehung der Teilchen wird als Fragmentierung bezeichnet. Der Prozeß der Abschirmung ist unter dem Begriff des Confinements bekannt.

Bisher wurde vernachlässigt, dass die Masseneigenzustände der Teilchen nicht mit den Eigeigenzuständen identisch sind. Es treten Mischungen der Teilchenzustände auf. Die Masseneigenzustände der elektroschwachen Wechselwirkung, d.h. Photonen,  $W$ - oder  $Z$ -Bosonen sind nicht identisch zu den Eigeigenzuständen  $B$ ,  $W^1$ ,  $W^2$  und  $W^3$ , sondern Mischungen. Die Mischung der Quark-Eigeigenzustände zu den Masseneigenzuständen wird durch die CKM-Matrix (Cabibbo Kobayashi Maskawa) beschrieben.

Das SM beschreibt die Wechselwirkungen der Elementarteilchen in bisher vollständiger Übereinstimmung mit dem Experiment, enthält aber 19 Parameter [2]. Diese sind:

- 3 Kopplungskonstanten der  $SU(3) \times SU(2) \times U(1)$  Symmetriegruppe, ( $\alpha$  (EM Kopplung),  $\alpha_s$  (Starke Kopplung) und der Weinbergwinkel  $\theta_w$ )
- 3 Winkel der CKM Matrix
- 1 Komplexe Phase in der CKM Matrix, die CP-Verletzung bewirkt
- 1 Parameter, der CP-Verletzung der Starken WW ermöglicht
- 9 Fermion Massen (Quark- und Leptonmassen)
- 1  $Z$ -Boson Masse  $m_Z$
- 1 Higgs-Boson Masse  $m_H^2$

Die genaue Kenntnis dieser Parameter ist wichtig, um das SM zu determinieren. Die Higgs-Masse ist bisher unbekannt und bringt so eines der größten Probleme des SM mit sich: Falls das Higgs-Teilchen am LHC nicht nachgewiesen werden kann, wird man die Theorie des SM umformulieren müssen oder wenigstens andere Mechanismen zur Erzeugung massiver Eichbosonen finden müssen.

## Der Higgs Mechanismus

Das Standardmodell postuliert im Rahmen der Theorie zur elektroschwachen Vereinigung [3] die Existenz eines massiven skalaren Feldes, dem sogenannten Higgs-Feld.

---

<sup>2</sup>In der Theorie freier Parameter, experimentell nicht nachgewiesen.

Die Theorie des Higgs-Feldes beruht auf dem Prinzip der spontanen Symmetriebrechung und wurde 1964 von Peter Higgs [4] eingeführt, um damit die Entstehung massiver Eichbosonen zu erklären.

Es wird der Higgs Mechanismus motiviert. Hierzu betrachtet man die Lagrange-dichte  $L$  eines Feldes  $\Phi = (\phi_1, \dots, \phi_n)$ , wobei  $\phi_i$  für  $i=1, \dots, n$  skalar sind.

$$L = \partial_\mu \phi_i \partial^\mu \phi_i - V(\Phi) \quad (2.1)$$

$$V(\Phi) = \frac{\lambda}{4} (|\Phi|^2 - \frac{\mu}{2})^2 \quad (2.2)$$

Für  $\lambda < 0$  ist das Problem unphysikalisch, da es keinen Grundzustand gibt. Daher sei  $\lambda > 0$ . Zudem sei  $\mu^2 > 0$ , da sonst keine spontane Symmetriebrechung vorliegt. Es liegt dann ein sogenanntes Doppelmuldenpotential, wie in Abbildung 2.7 links für den Fall  $n=2$  zu sehen ist, vor, welches einen entarteten Grundzustand aufweist. Nach Wahl eines der entarteten Grundzustände  $v$  für das Feld  $\vec{\phi}$  ist die Symmetrie spontan gebrochen. Das Feld lässt sich dann mit neuen Feldern  $\eta, \xi$  parametrisieren:

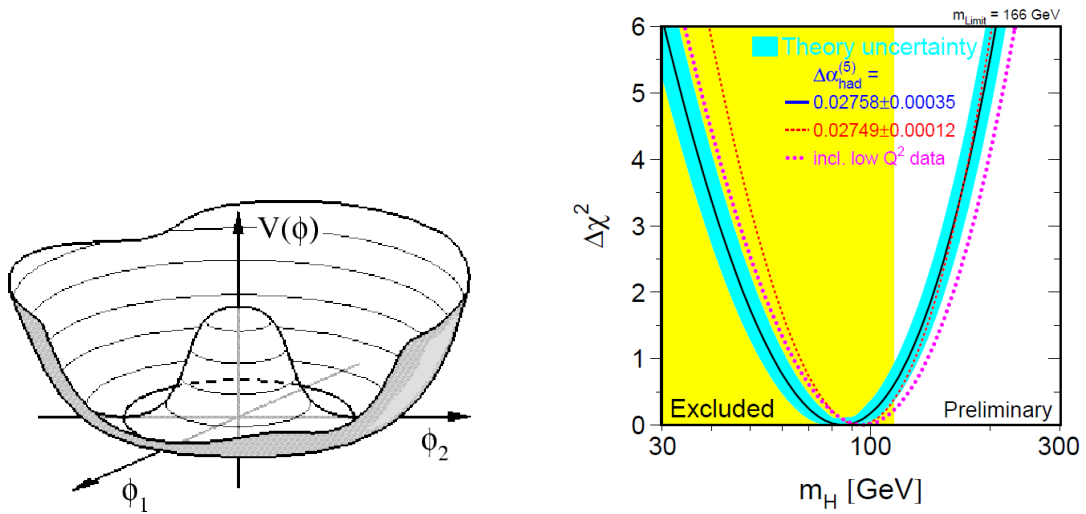
$$\Phi(x) = (v + \frac{1}{\sqrt{2}}\eta(x)) \exp \left\{ i \left( \Theta + \frac{\xi(x)}{\sqrt{2}\|v\|} \right) \right\} \quad (2.3)$$

Genau wie  $\phi$  ist  $\eta$  ein  $n$ -dimensionales Feld, allerdings nur mit  $n-1$  unabhängigen Komponenten.  $\xi$  parametrisiert Drehungen des Feldes unter der globalen  $U(1)$  Symmetrie. Schreibt man die ursprüngliche Lagrangedichte  $L = L(\Phi)$  um, als  $L = L(\eta(x), \xi(x))$ , so entsteht ein Massenterm nur für  $\eta$ , während  $\xi(x)$  ein masseloses Skalarfeld ist. Je nachdem, wieviele Komponenten von  $\eta(x)$  unabhängig sind, entsteht für jede dieser Komponenten ein Skalarfeld, welches Masse trägt. In der elektroschwachen Vereinigung ist die Dimension  $n=2$ . Das heißt, es ergibt sich genau ein massives Skalarfeld, das masselose  $\xi$  verschwindet aufgrund der Symmetrie durch lokale  $U(1)$  Transformationen und ist deshalb unphysikalisch.

Trotz der sonst hervorragenden Übereinstimmung des Standardmodells mit Experimenten, konnte bisher kein Higgs-Teilchen nachgewiesen werden. Die SM Parameter aus der Theorie der elektroschwachen Wechselwirkung wurden in verschiedenen Experimenten bestimmt und mit der Theorie verglichen. Abbildung 2.7 rechts zeigt den sogenannten "Blue-Band-Plot". Er gibt das  $\Delta\chi^2$  eines Anpassens der SM-Parameter der elektroschwachen Theorie an vorhandene Daten als Funktion der Higgs-Masse an. Durch Experimente direkt ausgeschlossene Massen  $m_{Higgs} \leq 114 \text{ GeV}$  sind gelb unterlegt.

Eines der Hauptziele des ATLAS-Experimentes ist es, das Higgs-Boson nachzuweisen, falls dieses wie vorhergesagt existiert. In Abhängigkeit von der Higgs-Masse





**Abb. 2.7:** (**Links**): Einheitliches Doppelmulden-, Mexican-Hat- oder auch Flaschenbodenpotential, (**rechts**): Blue-Band-Plot,  $\Delta\chi^2$  des Fits der elektroschwachen Theorie an die experimentell bestimmten Parameter gegen die Higgs-Masse [5].

gibt es verschiedene Vorhersagen zu den zu betrachtenden Zerfallskanälen oder Produktionsmöglichkeiten. Weiterhin sollen Theorien, die über das Standardmodell hinausgehen, untersucht werden.

## 2.3 Physik jenseits des Standardmodells

Obwohl das Standardmodell in Experimenten bisher exzellent bestätigt wird, gibt es Gründe es als niederenergetischen Grenzfall in eine fundamentalere Theorie einzubetten. Um einige der Probleme des Standardmodells zu nennen [6, 7]:

- Woher stammen die Quantenzahlen der Fermionen? Warum sind die Ladungen der Quarks Drittel der Elektronladung oder warum existiert die Hyperladung in Vielfachen von  $\frac{1}{6}$  und sorgen so für exakte Neutralität der Materie? ( $\frac{|q_p+q_e|}{e} < 10^{-21}$  [8])
- Warum treten Leptonen und Quarks in drei Generationen auf? Gibt es weitere Generationen bei höheren Energien? Warum erstrecken sich die Massen der Teilchen vom Tau-Neutrino bis zum Top-Quark über 13 Größenordnungen?
- Das SM besitzt keine Erklärung für dunkle Materie.
- Woher stammen die drei Eichgruppen? Sind diese Untergruppen einer gemeinsamen fundamentaleren Eichgruppe?

- Warum ist die "starke Wechselwirkung" stark und die "schwache Wechselwirkung" schwach?
- Gravitation lässt sich bisher nicht als renormierbare Eichtheorie in das SM einbetten und aufgrund der Schwäche in Experimenten auf mikroskopischen Skalen nicht beobachten.
- Wie geschieht die elektroschwache Vereinigung? Das Higgs-Boson wurde bisher nicht beobachtet. Warum nimmt das Higgs-Boson eine Sonderrolle als einziges skalares Teilchen ein?
- Das SM hat eine große Hierarchie von Massenskalen. Die Massenskala der Planckmasse  $M_P \approx 10^{18} \text{ GeV}$ <sup>3</sup> und der Energieskala der elektroschwachen Vereinigung  $M_W$  unterscheiden sich um  $\frac{M_P}{M_W} \approx 10^{17}$ .
- Die Higgs-Masse  $m_{Higgs}$  erhält durch Strahlungskorrekturen Störungen der Masse von der Größenordnung  $O(\Lambda^2)$ , wobei  $\Lambda$  den ultravioletten Cutoff des SM darstellt. Ist das SM gültig bis zu  $M_P$ , so erhält das Higgs-Boson extrem große Massenkorrekturen, die auf eine vergleichsweise kleine Masse von  $m_{Higgs} \approx O(100 \text{ GeV})$  führen, was man auch als Fine-Tuning oder Natürlichkeitsproblem bezeichnet.

Einige dieser Problemstellungen werden von Theorien, die zum Beispiel Supersymmetrie [6] oder die Existenz von Extradimensionen [9] voraussetzen, gelöst. Allerdings werden sich solche Theorien "neuer Physik" harter Proben durch die Experimente am LHC unterziehen lassen müssen und einige der Modelle dürften in den nächsten Jahren falsifiziert werden.

---

<sup>3</sup>Die Planckmasse gibt die Energieskala an, bei der die Gravitation von der Stärke der anderen Wechselwirkungen im SM ist.

### 3. Das ATLAS-Trigger- und Datennahmesystem

Dieses Kapitel behandelt das Triggersystem des ATLAS-Experiments. Der Schwerpunkt wird auf der Beschreibung des Kalorimeter-Triggers der ersten Stufe und dessen Pre-Prozessor-Systems (PPr) liegen. Außerdem wird der analoge Signalweg vom Detektor bis zum PPr beschrieben.

#### 3.1 Der ATLAS-Trigger

Der ATLAS-Trigger ist das System zur Online-Ereignisselektion. Die Kollisionsrate von 40 MHz kombiniert mit einem Speicherbedarf von ca. 1.5 MB pro gespeichertem Ereignis erzwingen die Notwendigkeit eines Triggersystems. Schriebe man jedes Ereignis auf Band, so hätte man bereits nach etwa 2 Monaten Datennahme ausreichend Daten, um damit einen Stapel CDs von der Höhe des Erde-Mond-Abstandes damit beschreiben zu können.

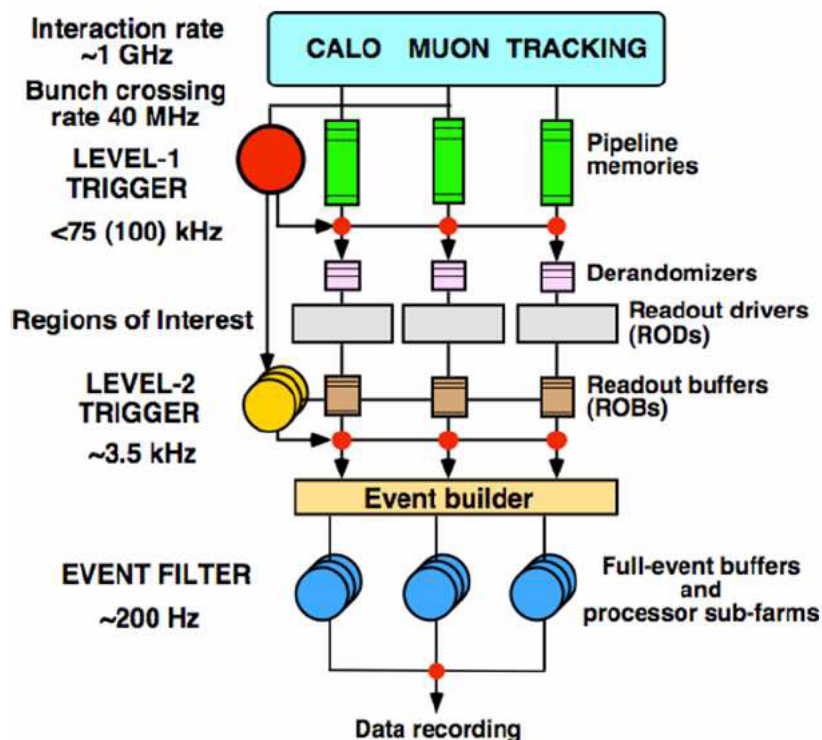


Abb. 3.1: Schema des ATLAS-Triggersystems [10]

Das ATLAS-Triggersystem ist in drei Stufen aufgebaut, um eine erste Online-Ereignisselektion, ohne den Detektor vollständig auszulesen, bereits innerhalb von  $2.5 \mu\text{s}$  betreiben zu können und um für gezieltere Auswahl der Ereignisse, unter Verwendung der gesamten Detektorinformation, mehr Zeit zur Verfügung zu haben. Die Abbildung 3.1 zeigt den schematischen Aufbau des ATLAS-Triggersystems. Damit ein Ereignis aufgezeichnet wird, bedarf es dreier konsekutiver positiver Triggerentscheidungen aller drei Stufen. Der Level-1 Trigger ist ein Hardware basiertes System, dem Informationen der Kalorimeter und des Myonsystems von reduzierter Granularität zur Verfügung stehen. Er nimmt eine grobe Selektion der Ereignisse vor. Der Level-2 Trigger und der Event Filter, die dritte Triggerstufe, verwenden die gesamte Detektorinformation, um die Ereignisse auf Computerfarmen mit insgesamt 2100 Prozessoren zu rekonstruieren.

### Der Level-1 Trigger

Die erste Triggerstufe (Level-1 (L1)) hat die Aufgabe, die Rate der Ereignisse von der der Strahlkreuzungen von 40 MHz auf 75 kHz zu reduzieren. Der Level-1 Trigger ist ein Hardware basiertes System, mit programmierbarer Logik, welches im 40 MHz Takt die Information der Kalorimeter und des Myon-Systems bei verminderter Granularität für alle Kanäle parallel verarbeitet.

Die Myonsysteme und die Prozessoren des Kalorimeter-Triggers geben jeweils unabhängig voneinander Informationen über Anzahlen von überschrittenen Triggerschwellen des Ereignisses an den zentralen Trigger Prozessor (CTP) weiter, der dann eine positive Triggerentscheidung auf erster Stufe, ein sogenanntes L1A (Level-1 Accept), generieren kann. Es werden Signaturen von Objekten wie hochenergetischen Elektronen, Photonen, Muonen oder Taus, aber auch fehlender Transversalimpuls oder Jets im Detektor identifiziert und Regionen von Interesse zugeordnet. Allerdings ist der Level-1 Trigger kein topologischer Trigger, die Regionen von Interesse werden ausschliesslich für die Algorithmen zur Entscheidung des Level-2 Triggers ermittelt.

Da die  $24.95 \text{ ns}$  Abstand zwischen den Strahlkreuzungen keine Prozessierung der Ereignisse zulässt, wird die Information des Detektors in Puffern von 100 BC Tiefe, d.h.  $2.5 \mu\text{s}$ , die nah am Detektor liegen, zwischengespeichert. Nur wenn eine positive Triggerentscheidung auf erster Stufe, ein L1A generiert wurde, wird der Zwischenspeicher am Detektor ausgelesen und zur weiteren Prozessierung an den Level-2 Trigger gegeben.

Für eine positive Triggerentscheidung steht dem L1-Trigger eine Zeit von  $2.5 \mu\text{s}$  zur Verfügung, die durch die Pufferlänge begrenzt ist. Eine weitere Einschränkung dieser Zeit ist durch die Laufzeit der Signale in den Kabeln vom Detektor zum Standort des

Pre-Prozessor-Systeme und zurück gegeben. Bei ca. 5 ns/m Laufgeschwindigkeit der Signale in den Kabeln, von bis zu 70 m Länge, geht etwa eine  $\mu\text{s}$  für die Prozessierung verloren. Um dennoch in der Lage zu sein, Entscheidungen in der vorhandenen Zeit zu treffen, arbeitet der Level-1 Trigger mit verringerter Granularität der Detektorzellen. Der L1-Kalorimeter-Trigger verwendet in der Detektorelektronik zu sogenannten Trigger-Towern summierte Signale der Kalorimeterzellen. Das Muon-System besitzt die RPCs und TGCs (siehe Kapitel 2), die schlechtere Ortsauflösung als die MDTs oder CSCs bieten, aber schnelle Triggerentscheidungen gestatten. Der Kalorimeter-Trigger der ersten Stufe wird ausführlich in Abschnitt 3.3 behandelt.

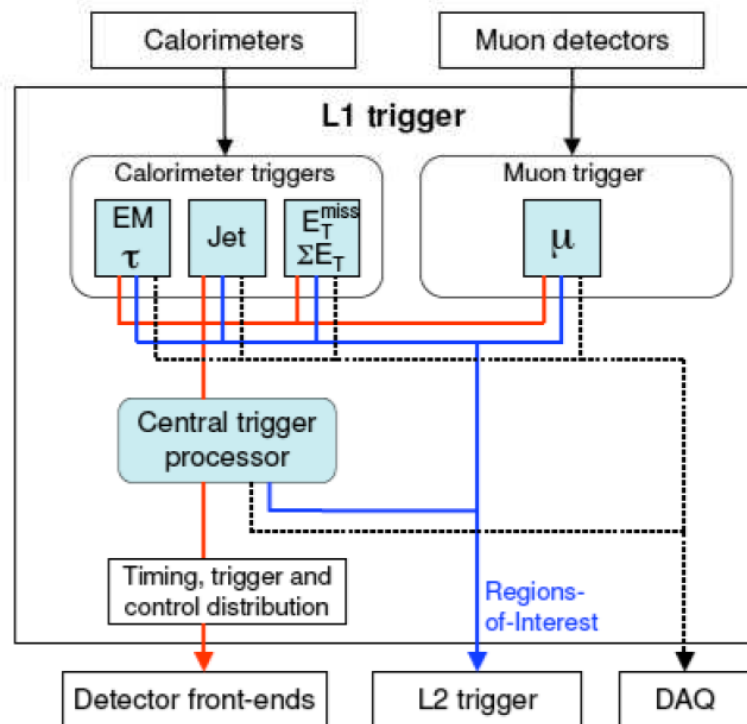


Abb. 3.2: Der ATLAS Level-1 Trigger [10]

Abbildung 3.2 zeigt ein Schema des L1-Trigger-Systems. Die Kalorimeter und die Myon-Detektoren geben analoge Signale an den Kalorimeter- bzw. den Myon-Trigger. Nach der Prozessierung werden die Ergebnisse der CTP übergeben, die dann die Triggerentscheidung fällt. Es gibt drei unterschiedliche Datenströme, die die erste Triggerstufe verlassen. Der erste leitet die L1As an den Detektor zurück, um die Auslese der Zwischenspeicher für den Level-2 Trigger auszulösen. Der zweite übergibt ermittelte Regionen von Interesse (Regions of Interest (RoI)) an den Level-2 Trigger. Auf dem dritten Datenweg können sämtliche Informationen der L1-Teilsysteme der Datennahme (Data Acquisition (DAQ)) übergeben werden, um diese zu speichern.

Dies ermöglicht es, die einzelnen Komponenten des Level-1 Triggers zu überwachen, Ergebnisse von Kalibrationsläufen auszuwerten oder Triggerentscheidungen nachzuvollziehen.

### **Der Level-2 Trigger**

Die zweite Stufe des ATLAS-Triggers, die als Level-2 (L2) Trigger bezeichnet wird, ist dazu bestimmt die Ausgangsrate des Level-1 Triggers von bis zu 100 kHz auf eine Ausgangsrate von maximal 2 kHz zu reduzieren. Dem L2-Trigger wird zur Prozessierung der Ereignisse eine Zeit von durchschnittlich 10 ms pro Ereignis gestattet, wobei aufzuzeichnende Ereignisse deutlich mehr Zeit  $O(100\text{ ms})$  in Anspruch nehmen. Die Algorithmen des Level-2 Triggers sind in Software auf einer Computerfarm implementiert.

Dem Level-2 Trigger steht für die Auswahl der Ereignisse die gesamte Detektorinformation auf voller Granularität, inklusive der durch den ID rekonstruierten Spuren, zur Verfügung sowie die von den L1-Systemen ermittelten Regionen von Interesse (RoI's). Die Auswahl der Ereignisse verfolgt zwei leitende Prinzipien:

- RoI basierte Rekonstruktion der Ereignisse.
- Schrittweise Selektion der Ereignisse, um Ereignisse, die keine positive Triggerentscheidung mehr herbeiführen können, möglichst früh ablehnen zu können.

Beides hat zum Ziel, die benötigte Zeit zur Prozessierung und die benötigte Computerleistung zu minimieren.

### **Der Ereignis-Filter**

Der Ereignis-Filter (EF) bildet die letzte Stufe des Triggersystems des ATLAS-Experiments. Die Vorgabe ist, die Ereignisrate auf ca. 200 Hz zu begrenzen. Im EF findet die vollständige Rekonstruktion und Analyse der Ereignisse auf einer Computerfarm, mittels standardisierter, ATLAS eigenen und der Offline-Analyse nahen Anwendungen, statt. Pro aufgezeichnetem Ereignis stehen etwa 4 Sekunden zur Verfügung, im Mittel beträgt die Prozessierungszeit etwa 1 s.

Die hier akzeptierten Ereignisse werden über verschiedene Datenströme, die zwischen den identifizierten Objekten unterscheiden endgültig gespeichert. Die gespeicherten Ereignisse werden durchschnittlich eine Größe von etwa 1.5 MB haben und sind dann für Offline-Analysen verfügbar.

## 3.2 Die analoge Signalkette

Es wird hier ein Überblick über die analoge Signalkette der Kalorimetersignale bis zum Pre-Prozessor-System gegeben. Die analoge Signalkette beginnt in den Kalorimetern des Detektors bei der Erzeugung der analogen Signale, durch Verstärkung der Signale von Szintillatoren durch Photomultiplier im Tile bzw. durch Ionisation des LAr im LAr-Kalorimetersystem.

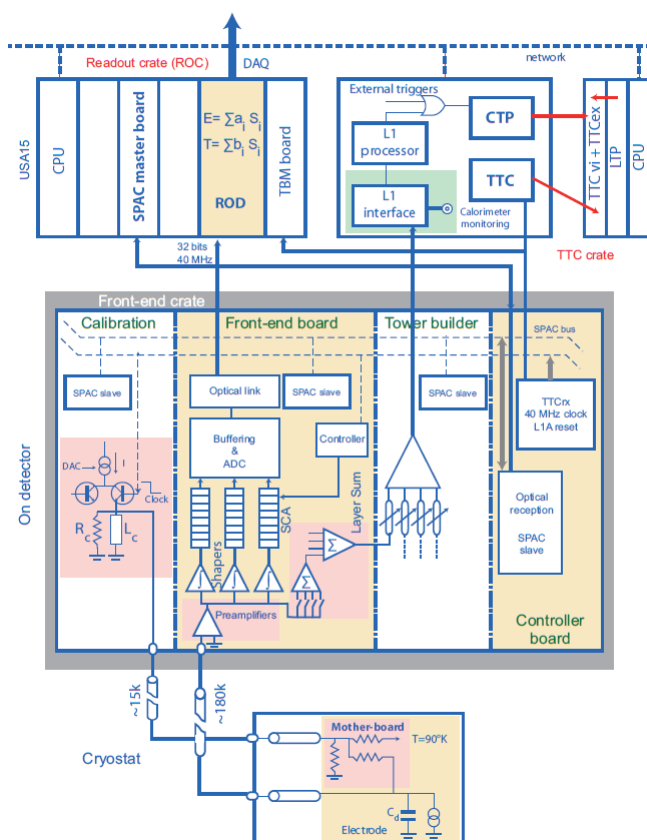
### Detektorelektronik

In beiden Kalorimetertypen steht Elektronik am Detektor (Front End Elektronik) bereit, um die Signale für den Level-1 bzw. den Level-2 Trigger vorzubereiten. Wichtige Aufgaben der detektornahen Elektronik der Kalorimeter sind:

- Vorverstärkung der analogen Signale
- Aufspaltung der Signalwege für L1- und L2-Trigger, bzw. die Datennahme
- Formen der analogen Signale der Zellen durch sogenannte Pre-Shaper für die Datenauslese
- Summieren der analogen Signale der einzelnen Zellen in den einzelnen Lagen der Kalorimeter und später der Signale der verschiedenen Lagen für grobere Granularität der L1-Kanäle zu den Trigger-Towern, danach analoge Kabel bis zum Receiver System vor dem Level-1 PPr System
- Digitalisieren und Zwischenspeichern der analogen Signale für vollständige Auslese des Detektors, danach Verwerfen der Daten oder Auslese für L2

Ein Block-Diagramm der LAr-Detektorelektronik ist in Abbildung 3.3 zu sehen. Man erkennt die oben aufgelisteten Komponenten der analogen Signalkette, das Kalibrationssystem des LAr-Kalorimeters, zur Erzeugung künstlicher Pulse (siehe: 4.1) sowie zusätzliche Infrastruktur, wie z.B. die 40 MHz Clock auf dem Controller Board.

In den Kalorimetern werden die Signale der einzelnen Zellen summiert. Dies ist entscheidend für eine schnelle Triggerentscheidung auf niedrigster Stufe. Die reduzierte Granularität von etwa 7200 Kanälen ermöglicht eine Triggerentscheidung innerhalb der vorgegebenen Zeit. Man beachte, dass die Kanäle des EM Kalorimeters die transversale Energie, die des hadronischen Kalorimeters die gesamte Energie angeben, die in den Zellen gemessen wurde. Im LAr-Kalorimeter sind die Zellen kleiner



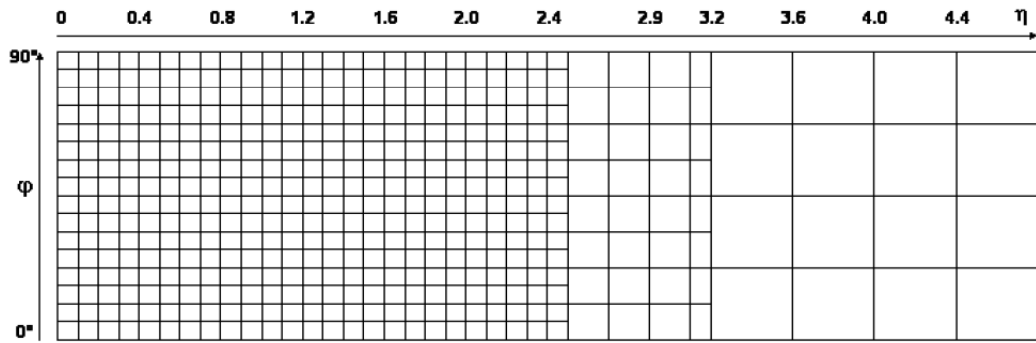
**Abb. 3.3:** Die LAr-Front-End-Elektronik [11]

als im Tile-Kalorimeter in der zentralen Region, so dass die Zahl der summierten Zellen von wenigen in der Endkappen Region bis zu 60 im EMB des LAr-Kalorimeters variiert. Im Tile werden die meisten Trigger-Tower aus Signalen von 5 Sekundärelektronenvervielfältigern addiert.

Die Granularität der Trigger-Tower, wie sie der Level-1 Kalorimeter-Trigger verwendet, ist anhand des Beispiels eines Quadranten in  $\phi$  mit  $\eta > 0$  in Abbildung 3.4 abgebildet. Die anderen Regionen sind entsprechend aufgebaut. Am kleinsten<sup>1</sup> sind die Zellen für  $0 < \eta < 2.5$  in der zentralen Region mit  $\Delta\eta \times \Delta\phi = 0.1 \times 0.1$ . Daran schließen sich Zellen der Größe  $0.2 \times 0.2$ , gefolgt von einer Lage  $0.1 \times 0.2$  und schließlich die größten Trigger-Tower mit  $0.4 \times 0.4$  in der FCal Region. Die Signale der Trigger-Tower erreichen in 616 Kabeln von je 16 Kanälen, nach 30 bis 70 m Laufweg, das Recieversystem in der USA 15 Halle.

<sup>1</sup>In  $\eta - \phi$ , räumlich sind die Zellen für große Pseudo-Rapidity am kleinsten. Beachte Definition von  $\eta$ .





**Abb. 3.4:** Größen der Trigger-Tower des Level-1 Kalorimeter-Triggers in  $\eta \phi$  [10]

### Das Receiversystem

Die Receiver modifizieren die analogen Signale derart, dass sie von den Pre-Prozessor-Modulen übernommen werden können. Die Receiver können über lineare, mit einem DAC steuerbare Verstärker die Eingangsstärke (Eng.: Gain) der Signale durch unterschiedlich lange Laufwege korrigieren. Bis zu den Receiver-Modulen geben die Kanäle des hadronischen Kalorimeters die Energie  $E$  statt der transversalen Energie  $E_T$  an. Sie werden hier, in Abhängigkeit des Polarwinkels  $\theta$ , auf  $E_T$  skaliert.

Die Receiver bieten für einige Kanäle die Möglichkeit, Kalorimetersignale auf dem Oszilloskop zu betrachten. Dies ist die einzige Möglichkeit analoge Kalorimetersignale zu beobachten, wenn der Detektor geschlossen ist. Als differentielle Signale erreichen die Kalorimeterpulse die Eingänge der Pre-Prozessor-Module.

## 3.3 Der Kalorimeter-Trigger der ersten Stufe

Der Level-1 Kalorimeter-Trigger (L1Calo) bildet zusammen mit dem Myon-Trigger und dem zentralen Trigger Prozessor (CTP) die erste Stufe des ATLAS-Triggers. Die digitalen Kalorimetersignale werden im 40 MHz Takt des LHC parallel prozessiert, um in der Lage zu sein innerhalb von  $2\mu s$  eine Triggerentscheidung fällen zu können. Die verschiedenen strukturellen Einheiten des L1Calo Triggers sollen hier behandelt werden, ohne dass auf die Hardwarekomponenten detailliert eingegangen wird. Dies wird in der Sektion über das Pre-Prozessor-Modul 3.4 geschehen.

Der L1Calo Trigger hat die Aufgabe, Triggerobjekte oberhalb von wählbaren Energieschwellen zu identifizieren und deren Anzahlen dem CTP zur Triggerentscheidung mitzuteilen. Außerdem besitzt er die Aufgabe in den Kalorimetern nach Regionen, in denen viel Energie deponiert wurde, den sogenannten Regionen von

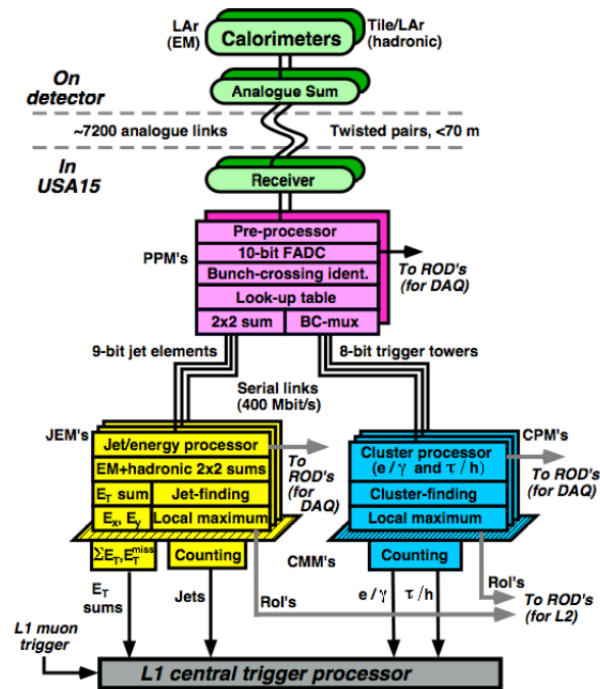


Abb. 3.5: Der ATLAS Level-1 Kalorimeter-Trigger [10]

Interesse oder Regions of Interest (RoI) zu suchen und diese dem Level-2 Trigger für erleichterte Triggerentscheidung zu übergeben. Die Signale der Kalorimeter werden in digitalisierter Form im 40 MHz Takt des LHC in einem Pipeline artigen System prozessiert.

Abbildung 3.5 skizziert die Struktur des L1Calo Triggers. Der L1Calo Trigger erhält etwa 7200 analoge Eingangssignale, die zunächst auf den 124 Pre-Prozessor-Modulen (PPMs) mit je 64 Kanälen, in einen 10 Bit ADC-Wert (Analog to Digital Conversion) von 0-1023 ADC-Einheiten umgewandelt werden. Außerdem werden den digitalisierten Werten durch die sogenannte Bunch Crossing Identification (BCID) die korrekte Strahlkreuzung zugeordnet. Darüber hinaus wird die Energie der Pulse bestimmt.

Nach weiterer Pre-Prozessierung übergeben die PPMs die Onlinedaten in zwei parallelen Datenströmen an den Cluster-Prozessor (CP) und den Jet/Energy-Prozessor (JEP). Diese suchen mit verschiedenen Algorithmen nach Strukturen von Elektron-, Photon-, Jet- oder Tau-Energiedepositionen in den Kalorimetern und bilden daraus RoIs, die dann dem Level-2 Trigger übermittelt werden.

Nur der CTP kann die Triggerentscheidung fällen und der Detektorelektronik zur vollständigen Auslese mitteilen. Vom CTP werden außerdem Ereignisse durch Skalierung oder Vetos abgelehnt, um die Rate der L1As zu kontrollieren.

## Der Pre-Prozessor

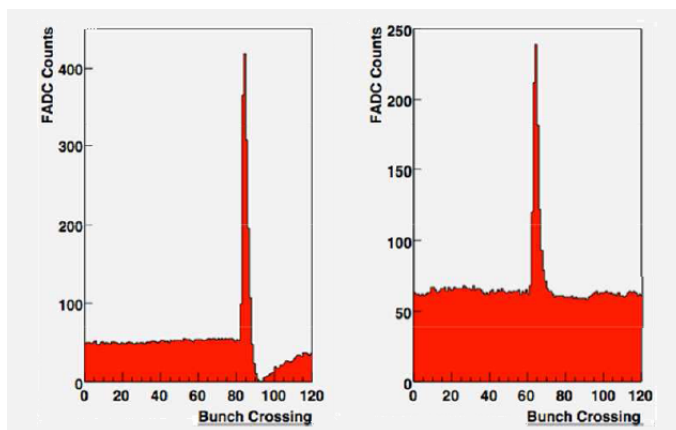
Der Pre-Prozessor digitalisiert die analogen Kalorimetersignale und bereitet die Daten in einer Weise auf, dass sie vom JEP und CP verarbeitet werden können. Das Pre-Prozessorsystem besteht aus 8 9U VME64xP Crates, die die insgesamt 124 Pre-Prozessor-Module beherbergen. Jedes der PPMs empfängt 4 analoge Kabel von den Receivern, die jedes 16 Signale tragen. Alle PPMs sind identisch und tragen 4 Eingangsplatinen und 16 Multi-Chip-Module (MCMs) auf denen die Digitalisierung und digitale Signalvorbereitung stattfindet. Desweiteren werden Raten auf den MCMs bestimmt. Jedes PPM besitzt außerdem ein Kontrollsystem, über welches sich Temperaturen und Spannungen auf dem PPM kontrollieren lassen. Folgende Aufgaben werden vom Pre-Prozessor für jeden Kanal erfüllt:

- Einstellung eines konstanten Sockelwertes, des sogenannten Pedestal-Wertes, durch einen DAC-Wert auf der Eingangsplatine für die analogen Signale (AnIn)
- Digitalisierung und Bearbeitung der analogen Signale im 40.08 MHz Takt des LHC durch Flash ADCs (FADC) zu 10-Bit Einheiten
- Synchronisierung der Signale mit Präzision von bis zu einer Nanosekunde, zur Korrektur verschiedener Flugzeiten der Teilchen oder Laufzeiten der Signale in den Kabeln, durch den Phos4-Chip zur Feinsynchronisierung
- Digitale Filterung der ADC-Signale durch den FIR Filter (ASIC)
- Generierung eines 8-Bit LUT-Wertes (Look Up Table) zur Energiekalibration, wobei das Pedestal subtrahiert, nicht-Linearitäten korrigiert und ein Schwellenwert angelegt (Eng.:Noise Cut) werden (ASIC)
- Zuordnung der Signale zur korrekten Strahlkreuzung der sogenannten BCID von einem anwendungsbezogenen Schaltkreis oder Application Specific Integrated Circuit (ASIC)
- Summierung der Energien von je  $2 \times 2$  Trigger-Towern zu 9-Bit Jet Elementen für den JEP (ASIC)
- Zusammenfassen von je zwei Trigger-Tower Signalen (je 8-Bit) auf ein Kabel, durch sogenanntes Multiplexing für den CP (ASIC)
- Erstellung differentieller Signale mit niedriger Spannung, sogenannten Low Voltage Differential Signals (LVDS) zur Datenübertragung für die Kanäle des JEP und CP durch LVDS Umsetzer, die mithilfe von Field Programmable Gate Arrays (FPGAs) an CP und JEP geleitet werden

- Übergabe von ADC- und LUT-Werten an die Ausleseelektronik (Eng.: Read Out Driver (RODs)) des Datennahmesystems (DAQ) zur Offlineanalyse
- Übergabe von System- und Konfigurationsinformation an Überwachungssysteme (Monitoring) außerhalb des PPMs durch das VMEbus (Versa Module Euro)

Außerdem werden die LUT- und bis zu 15 ADC-Werte aus Zwischenspeichern der Länge von 128 Strahlkreuzungen für jeden Kanal durch einen Zeiger ausgelesen und der Datennahme übergeben, falls ein L1A erfolgt. Dies ist essentiell für die Offlineanalyse und die Kalibration der Pre-Prozessor-Module. Diese Diplomarbeit basiert auf der Analyse dieser Daten.

Die vollständige Auslese des Zwischenspeichers ermöglicht es in Einzelfällen Signale über einen größeren Zeitraum zu betrachten. Zwei typische Pulse des LAr (links) und des Tile (rechts), wie sie im PreProzessor vorliegen, sind in Abbildung 3.6 zu erkennen. In beiden Fällen ist der Puls durch Formen des Signals auf einen Bereich von etwa 5 BC beschränkt, wobei der ansteigende Teil sich über ca. 50 ns erstreckt. Die Tile-Kalimeterpulse der Photomultiplier gehen direkt wieder auf den Wert des Sockelwertes zurück. Für das LAr-Kalimeter folgt auf den Puls für einige hundert Nanosekunden ein durch Formen herbeigeführtes Unterschreiten des Sockelwertes. Die Fläche der Unterschreitung ist etwa so groß, wie die des Pulses, so dass der Netto-Ladungsfluß verschwindet.



**Abb. 3.6:** (**Links**): Signal des LAr-Kalimeters im Zwischenpeicher des Pre-Prozessor MCMs [10](siehe: 3.4) (**rechts**): Signal des Tile-Kalimeters im PPr MCM [10].

Eine präzise Beschreibung der oben genannten Punkte und der Komponenten der Pre-Prozessor-Module wird in der Sektion 3.4 gegeben. Ein Blockdiagramm der hier aufgelisteten Dienste des PPMs für einen einzelnen Kanal ist in Abbildung 3.7 zu sehen.

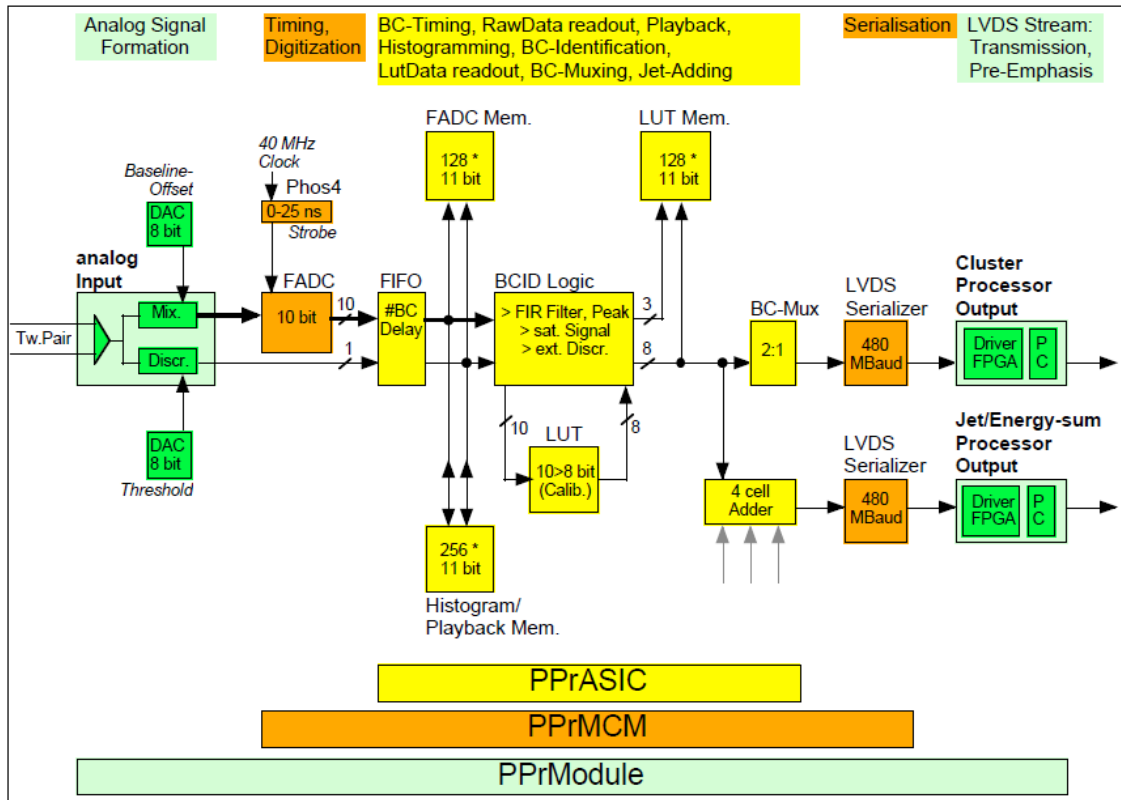


Abb. 3.7: Struktureller Aufbau des Pre-Prozessor-Moduls [12]

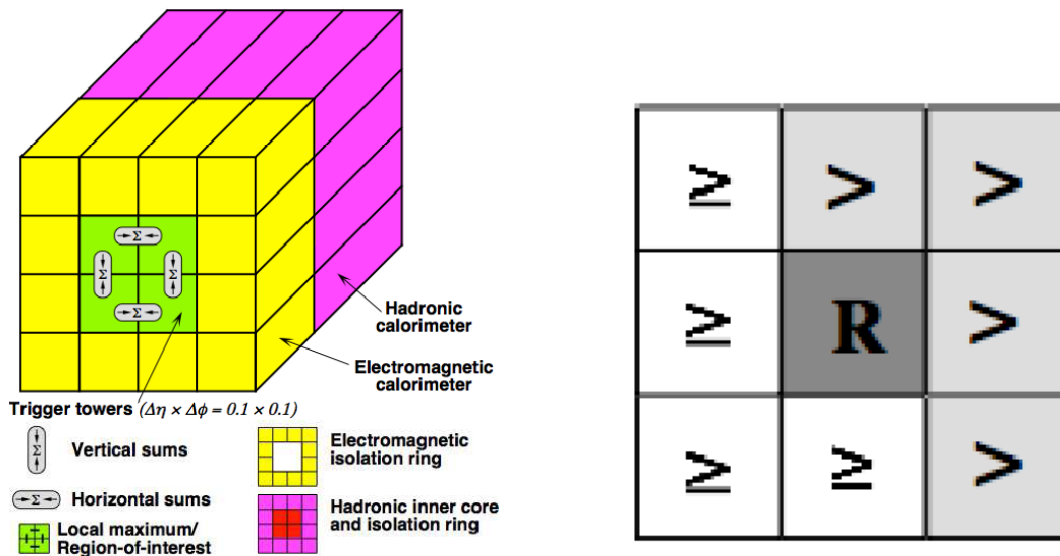
### Der Cluster-Prozessor

Der Cluster-Prozessor sucht in den Kalorimetern nach Energiedepositionen, die auf Elektron/Photon ( $e/\gamma$ ) oder Tau/Hadron ( $\tau$ /Hadron) Kandidaten hinweisen. Dazu wird das Kalorimeter in dem Bereich  $|\eta| < 2.5^2$  mit sich überlappenden Fenstern (Sliding Windows) abgedeckt, die systematisch für jedes Ereignis nach typischen Signaturen abgesucht werden. Das CP System ist installiert in 4 Crates, die jeweils einen Quadranten der Kalorimeter in  $\phi$  mit je 14 Cluster-Prozessor Modulen (CPMs) prozessieren.

Von einem Elektron oder Photon erwartet man Energiedepositionen ausschließlich im elektromagnetischen Kalorimeter. Hingegen für einen Tau-Kandidaten erwartet man auch im hadronischen Teil ein Signal zu sehen, da in Tau-Zerfällen häufig sekundäre Pionen auftreten. Die LUT-Werte der Trigger-Tower werden zu Zellen der Größe  $\Delta\eta \times \Delta\phi = 0.2 \times 0.2$  aufsummiert und mit ihrer Umgebung auf ein lokales Maximum abgeglichen.

<sup>2</sup>Alle Trigger-Tower mit  $0.1 \times 0.1$   $\eta$ - $\phi$  Granularität.

Abbildung 3.8 links zeigt eine  $4 \times 4$  Trigger-Tower große Region des EM- (vorne in gelb und grün) und des hadronischen Kalorimeters (hinten in magenta). Für eine Region von Interesse (RoI) durch einen  $e/\gamma$ -Kandidaten muss für eines der Paare von  $2 \times 1$  oder  $1 \times 2$  Trigger-Towern die Summe der Transversalenergien einen Schwellenwert überschreiten ( $>$ ). Gleichzeitig darf die  $E_T$ -Summe der 4 zentralen hadronischen Trigger-Tower eine Grenzenergie nicht überschreiten ( $\leq$ ). Für eine RoI eines  $\tau$ /Hadron-Kandidaten wird verlangt, dass die Summe der Transversalenergien eines der Paare mit den 4 hadronischen Trigger-Towern einen Minimalwert übertrifft ( $>$ ). Um Isoliertheit zu garantieren darf die  $E_T$ -Summe der 12 benachbarten Trigger-Tower eine programmierbare Schwelle nicht überschreiten ( $\leq$ ).



**Abb. 3.8:** (Links):  $4 \times 4$  Trigger-Tower zur Identifikation von  $(e/\gamma)$  und  $(\tau/\text{Hadron})$  Objekten [10]. (rechts): Bedingungen für die  $E_T$ -Summe der ROI in ihrer Umgebung [10].

Diese Bedingungen legen die RoIs noch nicht eindeutig fest. Es könnten benachbarte  $2 \times 2$  Zellen dieselben Bedingungen erfüllen. Daher fordert man, dass eine Region von Interesse eine größere oder gleiche  $E_T$ -Summe aufweist, als die sie umgebenden  $2 \times 2$  Trigger-Tower Bereiche, wie in Abbildung 3.8 rechts zu sehen ist.

Es gibt 16 wählbare Kombinationen von Schwellen, von denen 8 für  $(e/\gamma)$  Trigger bestimmt sind und die weiteren 8  $(e/\gamma)$  oder  $(\tau/\text{Hadron})$  Bedingungen sein können. Durch die Wahl der Vergleiche von „ $>$ “ beziehungsweise „ $\leq$ “ lassen sich die einzelnen Bedingungen effektiv ausschalten. Indem der Maximalwert oder Null als Grenze gewählt werden, werden die Bedingungen nie bzw. immer erfüllt.

Um mit den oben genannten Algorithmen eine Region von  $16 \times 4$  Trigger-Towern mit einem CPM bearbeiten zu können, muss man die Daten dreier benachbarter Reihen (zwei oben, eine unten in  $\eta$ - $\phi$ ) oder Spalten (eine links, zwei rechts) von

Trigger-Towern an dasselbe CPM übertragen. Dies führt zu einer Verdoppelung des Datenstromes, wobei allerdings kein Kanal zu mehr als zwei CPMs geführt wird. Man erhält so mit hadronischen und EM Trigger-Towern eine Zahl von  $19 \times 7 \times 2 = 266$  Trigger-Towern pro CPM bzw. sogar  $20 \times 7 \times 2$ , da jeweils zwei Trigger-Tower auf einem Kabel zum CP übertragen werden.

Die erfüllten Triggerschwellen der CPMs und JEMs werden den Common Merger Modulen (CMMs) mitgeteilt, die die Triggerobjekte zunächst pro Crate und dann für alle Crates zählen. Außerdem bilden die CMMs Energiesummen pro Crate, die mit Schwellenwerten verglichen werden. Anschließend werden die Anzahlen der Triggerobjekte an den CTP zur Triggerentscheidung übergeben. Wenn ein L1A erfolgt, werden die RoIs der zweiten Triggerstufe mitgeteilt. Die Daten werden in sogenannten FIFOs (First In First Out) gespeichert bis ein L1A erfolgt und dann der Datennahme bzw. der nächsten Triggerstufe übergeben.

### Der Jet/Energiesummen-Prozessor

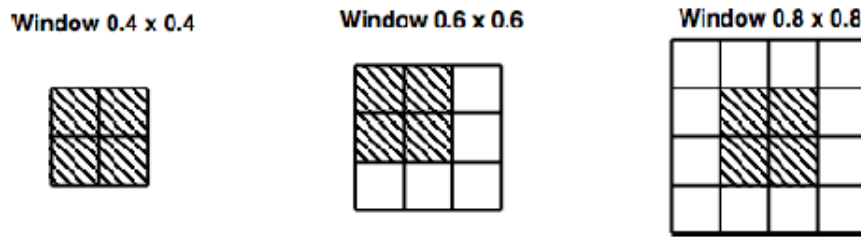
Der Jet/Energiesummen-Prozessor sucht auf einem Gitter von  $2 \times 2$  Trigger-Towern, den sogenannten Jet-Elementen nach Jet-Signaturen und bildet Summen der Transversalenergie und der fehlenden Transversalenergie  $E_{Tmiss}$ . Für ein Jet-Element wird die  $E_T$  Summe von  $2 \times 2$  Trigger-Tower aus dem EM und dem hadronischen Kalorimeter gebildet. Die Algorithmen zur Jet-Suche werden auf jeweils 16 sogenannten Jet/Energie-Modulen (JEMs) in zwei Crates ausgeführt. Der JEP deckt den gesamten Bereich von  $|\eta| < 4.9$  ab.

Der Jet-Trigger-Algorithmus summiert die Transversalenergien auf Fenstern der Größe von entweder  $2 \times 2$ ,  $3 \times 3$  oder  $4 \times 4$  Jet-Elementen. Falls die Energiesummen einen wählbaren 10 Bit Schwellenwert, der maximal 1023 beträgt, überschreiten, wird eine Region von Interesse von  $2 \times 2$  Jet-Elementen festgelegt, die wie in Abbildung 3.9 schraffiert, in den verwendeten Fenstern liegen können<sup>3</sup>.

Jedes Jet-Energie-Modul bearbeitet ein  $4 \times 8$  Fenster von Jet-Elementen. Wie im CP werden die Energien von drei benachbarten Reihen oder Spalten mitübertragen, um lokale Maxima zu finden. Acht Definitionen von Jet Trigger Objekten sind wählbar. Die Ergebnisse des JEP werden als drei Bit Worte ( $2^3 = 8$  Jet Definitionen) über die Backplane der Crates an die CMMs übertragen. Dort wird die Anzahl der Jets im System bestimmt und dem CTP mitgeteilt.

---

<sup>3</sup>Im Falle von  $3 \times 3$  Jet Elementen gibt es 4 mögliche ROI's. Es wird die der größten  $E_T$  Summe gewählt.



**Abb. 3.9:** Regionen von Interesse in Jet-Elementen verschiedener Größe in  $\eta - \phi$ . [10]

### 3.4 Das Pre-Prozessor-Modul

Die Hauptaufgaben der PPMs sind die Digitalisierung der analogen Signale und die Vorbereitung der digitalen Daten zur weiteren Prozessierung durch den Jet- und den Cluster-Prozessoren. Dies beinhaltet die BCID, die Synchronisierung der Signale oder die Energiekalibration.

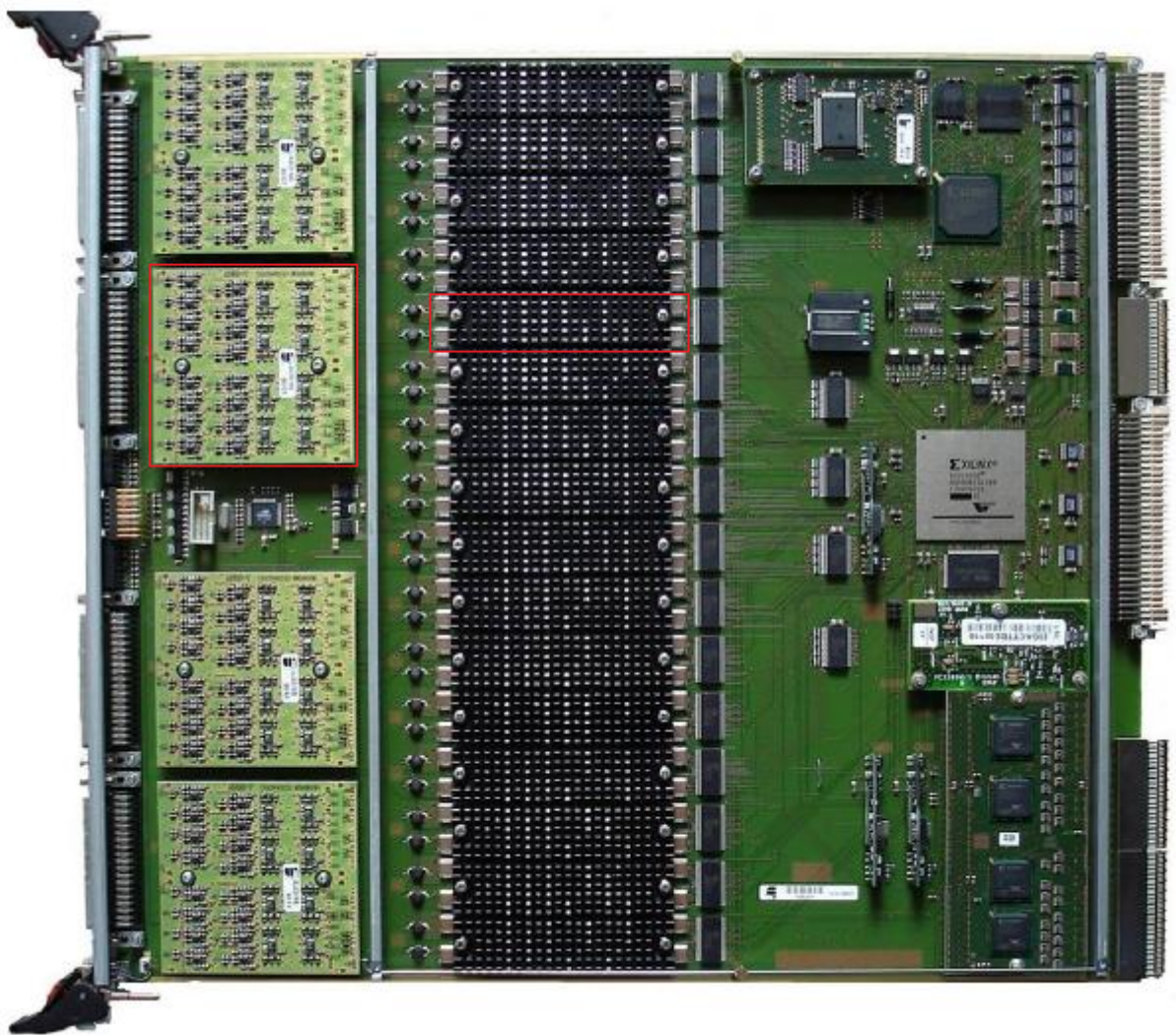
Abbildung 3.10 zeigt ein Pre-Prozessor-Modul. Man sieht links die 4 Anschlüsse für die Kabel, die je 16 Trigger-Tower Kanäle an die 4 benachbarten Analog-Eingangskarten übertragen. Zentral erkennt man die Wärmeableiter auf den Rückseiten der 16 Multi-Chip-Module, die die wesentlichen Schritte in der digitalen Datenvorbereitung durchführen. Der silbergraue Xilinx Chip rechts im Zentrum des Moduls ist ein FPGA, der die digitalen Daten der MCMs zur Weitergabe an das Datennahmesystem (DAQ) formatiert. Außerdem konfiguriert der FPGA das PPM über den VMEbus. Auf der rechten Seite befinden sich vier Anschlüsse. Von oben nach unten sind dies ein VMEbus Ausgang zur Konfiguration und Überwachung des PPM, ein Anschluss für Service Module, der VME Ausgang zur Datennahme sowie der LVDS Ausgang, durch den die Onlinedaten an den Cluster-Prozessor und den Jet/Energie-Prozessor übertragen werden.

Es wird nun im Folgenden kurz auf die Funktion der analogen Eingangskarte eingegangen. Eine Beschreibung des Multi-Chip-Moduls und seiner Komponenten bildet den Schluß dieses Kapitels.

#### Die Analoge-Eingangskarte

Die Analoge-Eingangskarte (AnIn) empfängt 16 analoge differentielle 3 V Signale der Trigger-Tower von den Receivern. Das differentielle Signal muss in ein unipolares Signal zwischen 1.9 V und 2.9 V umgewandelt werden, um im 10 Bit Fenster der Digitalisierung zu landen. Genauer gesagt, wird das differentielle 3 V Signal auf ein 1.2 V Fenster projiziert, welches sich durch einen wählbaren DAC-Wert verschieben





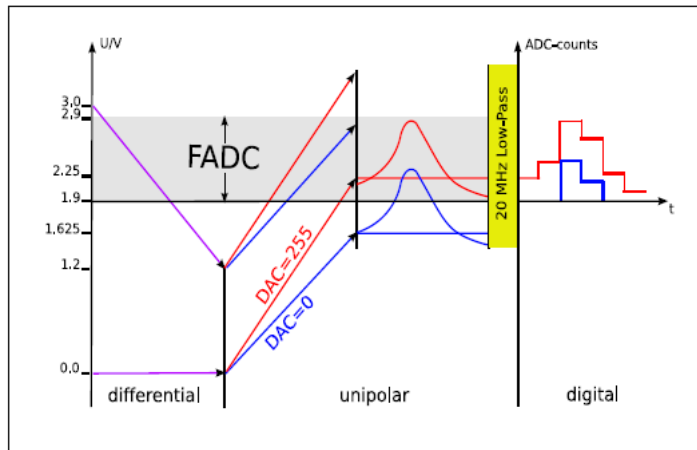
**Abb. 3.10:** Bestücktes Pre-Prozessor-Modul. Rot umrandet sind eine Analoge-Eingangs-Karte (links) und ein Multi-Chip-Modul. [12]

lässt.

Der DAC (Digital to Analogue Conversion) ist ein zwischen 0 und 255 wählbarer Wert, der den Sockelwert, den sogenannten Pedestal-Wert, bestimmt, der in der Digitalisierung entsteht, ohne dass ein Puls vorliegt. Abbildung 3.11 veranschaulicht die Funktionsweise der AnIn-Karte, insbesondere der Digital-zu-Analog-Umsetzung. Die Wahl eines DAC-Wertes von Null führt auf ein Ausgangssignal von 1.625 V und liegt somit unter der Schwelle der Digitalisierung. Der maximale DAC-Wert führt auf eine Ausgangsspannung von 2.25 V, wodurch man kleine digitale Pulse zwar komplett sehen kann, große Pulse allerdings schneller durch das von Null verschiedenen

Pedestal saturieren.

In den differentiellen Signalen entspricht eine Spannung von 0.1 V etwa einer Energie von 10 GeV. Bei 3 V, abgebildet auf ein 1.2 V Fenster und einer 10-Bit Digitalisierung eines 1 V Bereiches, entspricht ein Unterschied von 1 in den digitalen Einheiten einem Energieunterschied von 244 MeV. In einem Bereich von 0-250 GeV Transversaler Energie kann man also digitalisieren, bevor man in Sättigung gerät.



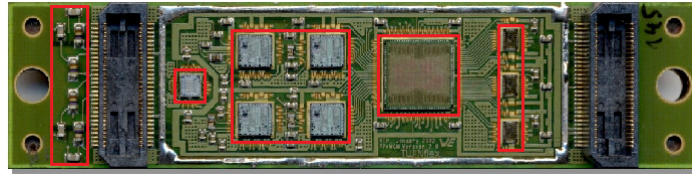
**Abb. 3.11:** Funktionsweise des DAC Wertes auf dem AnIn Bord, in der Digitalisierung [2]

Der DAC Wert sollte in linearer Abhängigkeit das Pedestal festlegen. Diese Abhängigkeit wird im DAC-Scan für jeden Trigger-Tower überprüft (siehe 4.2). Außerdem sendet die AnIn-Karte ein digitales Signal an die MCMs, falls eine vorgegebene Spannung überschritten wurde. Dieses Signal dient der sogenannten externen BCID.

### Das Multi-Chip-Modul

Das Multi-Chip-Modul [13] (MCM) ist die Einheit auf dem PPM, auf der die Digitalisierung und Prozessierung der Signale der Trigger-Tower zur Energiekalibration stattfindet. Die Module sind wie in Abbildung 3.10 auf den Pre-Prozessor-Modulen angeordnet. Ein Querschnitt eines MCMs ist in Abbildung 3.12 zu sehen. Von links nach rechts sind folgende Komponenten des MCMs in rot umrahmt:

- R-C Glieder von vier 20 MHz Tiefpass Filtern, um Rauschen zu unterdrücken.
- Ein Chip (Phos4) zur individuellen Verzögerung der Digitalisierung der vier Kanäle in Schritten von Nanosekunden.
- 4 schnelle 10-Bit Analog-zu-Digital-Umwandler (FADCs).



**Abb. 3.12:** Querschnitt eines Multi-Chip-Moduls. [12]

- Ein speziell für den Pre-Prozessor entwickelter Chip, welcher als PPr ASIC (Eng.: Application Specific Integrated Circuit) bezeichnet wird.
- 3 LVDS (Eng.: Low Voltage Differential Signal) Treiber, zur Erzeugung der Ausgangssignale.

Die Stationen der Prozessierung eines Kanals sind bereits in Abbildung 3.7 skizziert. Das analoge Signal wird zunächst auf hochfrequentes Rauschen gefiltert. Bevor es in den FADCs digitalisiert wird, kann der Phos4-Chip für eine Verzögerung der Clock der 4 Kanäle gegenüber dem sonst globalen 40 MHz Takt sorgen. Hiermit lässt sich Präzisionssynchronisierung für den L1Calo Trigger auf Nanosekunden erreichen. Was dies im einzelnen bedeutet, wird in Kapitel 4 Abschnitt 4.2 über den Phos4-Scan, der Signale mit einer Nanosekunde Abstand zwischen den Datenpunkten rekonstruiert so wie in Kapitel 5, erläutert.

Die FADCs digitalisieren die unipolaren analogen Signale in einem Bereich von 1.9 V bis 2.9 V in einen 10-Bit Wert. Ein Schritt von eins entspricht etwa einem Energieunterschied von 244 MeV in  $E_T$  (siehe oben) und wird im Folgenden als eine ADC-Einheit bezeichnet. Die ermittelten 10-Bit Werte werden als ADC-Werte bezeichnet.

Die ADC-Werte werden dem Pre-Prozessor ASIC übergeben, der in Heidelberg entwickelt und von AMS produziert wurde. In einem First-In-First-Out (FIFO) Zwischenspeicher können Zeitkorrekturen um Vielfache der 25 ns Schritte an jedem Kanal vorgenommen werden, um unterschiedliche Flug- oder Laufzeiten zu berichtigen. Dieser Schritt wird als Grobsynchronisierung bezeichnet. Als nächstes wird jedem ADC-Wert von der Logik des ASIC die richtige Strahlkreuzung zugeordnet. Dies bezeichnet man als Bunch Crossing Identification oder kurz BCID. Es stehen drei Verfahren für die BCID zur Verfügung:

- Die FIR Filter Methode: 5 konsekutive ADC-Werte werden mit unterschiedlichen Gewichten addiert. Man faltet die ADC-Werte mit der Form der zu erwartenden Pulse und projiziert diese heraus. Den Ergebnissen dieser Faltung, die

die gemessene Energie repräsentieren, wird die entsprechende Strahlkreuzung zugeordnet.

- Digitale BCID für gesättigte Pulse: Die ADC-Werte der zwei dem gesättigten ADC-Wert vorausgehenden Strahlkreuzungen werden mit einer großen und einer kleinen Schranke verglichen. Hierbei wird benutzt, dass die ansteigende Flanke aller Signale etwa 50 ns lang ist. So lassen sich auch Maxima von in den ADC-Werten gesättigter Signale der richtigen Strahlkreuzung zuordnen.
- Externe BCID: Das Analoge-Eingangs-Board sendet ein digitales Signal an den PPr-ASIC, falls eine Schwelle von ADC-Werten überschritten wird. Dies wird ebenfalls mit der bekannten Anstiegszeit der Signale verglichen und ordnet die richtige Strahlkreuzung zu.

Die in der FIR (Finite Impulse Response) Filter Methode berechneten 10-Bit Werte werden verwendet, um daraus die sogenannten LUT-Werte (Look Up Table), die der kalibrierten Energie in 8-Bit entsprechen, zu ermitteln. Liegt kein lokales Maximum der FIR-Summe vor, so wird der LUT-Wert gleich Null gesetzt. Zudem werden die LUT-Werte genau wie bis zu 15 konsekutiver ADC-Werte der Datenauslese übergeben und aufgezeichnet, falls ein L1A erzeugt wird. Ein Fenster von 5 ADC-Werten ist ausreichend, um den Puls von nicht gesättigten Signalen vollständig zu betrachten. Die Energien der LUT-Werte werden von den LVDS-Generatoren in Paaren von zwei Kanälen an den CP bzw. für ein MCM summiert an den JEP gesendet.

### Bezeichnungen der Trigger-Tower

An dieser Stelle soll die Bezeichnung der Trigger-Tower festgelegt werden, um Ergebnisse oder Statistiken nachvollziehbar zu machen. Jeder Trigger-Tower ist über 4 Nummern eindeutig festgelegt:

- Crate Nummer (0-7), 0-3 EM Kalorimeter, 4+5 EM/had LAr-Kalorimeter, 6+7 had. Tile-Kalorimeter.
- PPM Nummer (0-15), jedes Crate beherbergt 16 PPMs.
- PPM-MCM Nummer (0-15), auf jedem PPM befinden sich 16 MCMs.
- MCM Kanal Nummer (0-3), jedes MCM beherbergt 4 Kanäle.

Die Trigger-Tower werden dann in einer 8-stelligen Zahl mit arabischen Ziffern angegeben. Jede der vier Nummern nimmt zwei Stellen ein, die unter Umständen mit einer Null ergänzt werden. Als Beispiel: 03110201 entspricht Crate 3, PPM 11, MCM 2, Kanal 1.

## 4. Datennahme und Datenrekonstruktion

Dieses Kapitel gibt einen Überblick über die verschiedenen Verfahren zur Kalibration des Level-1 Kalorimeter-Trigger. Insbesondere wird der sogenannte Phos4-Scan eingeführt, der in weiteren Studien (siehe: Kapitel 5) die Zeitreferenz für die Synchronisation der Kanäle liefert.

### 4.1 Kalibrationssysteme

In der Inbetriebnahmephase (Eng.: Commissioning Phase) des ATLAS-Experimentes wird der Detektor mit Signalen, die nicht aus Proton-Proton Kollisionen stammen, kalibriert. Die Energiedepositionen stammen aus kosmischen Teilchen, die den Detektor durchqueren, oder Pulsersystemen. Zwei ähnliche Systeme für LAr- und Tile-Kalorimeter ermöglichen es, Spannungspulse in der Elektronik zu erzeugen. Nur dem Tile-Kalorimeter steht ein Lasersystem zur Verfügung, welches Lichtpulse in die Photomultiplier strahlt. Verfahren, in denen radioaktive Elemente zu Testzwecken in die Kalorimeter eingeführt werden, werden nicht besprochen.

#### Kosmische Signale

Ohne vorliegenden Strahl oder Kollisionen ist es trotzdem möglich, den Detektor mit Signalen echter Teilchen zu kalibrieren. Die Teilchen, die im Detektor festgestellt werden, sind fast ausschließlich Myonen, welche durch Kollisionen der kosmischen Primärstrahlung aus Protonen (85%) und  $\alpha$ -Teilchen (14%) mit der Erdatmosphäre produziert wurden. Die Protonen oder  $\alpha$ -Teilchen wechselwirken mit den Teilchen in der Atmosphäre und bewirken hadronische Schauer. In diesen entstehen Pionen, die mit 99.99 % Wahrscheinlichkeit in ein  $\mu \bar{\nu}_\mu$  Paar oder die entsprechenden Antiteilchen zerfallen.

Myonen werden beim Durchqueren der Erde kaum abgebremst. Daher passieren zahlreiche Myonen die Atmosphäre und die etwa 100 m Gestein bis zum ATLAS-Detektor. Neutrinos durchqueren im Allgemeinen den Detektor ohne Wechselwirkung. Die Myonen dagegen sind minimal ionisierende Teilchen, die im Detektor kleine Energiedepositionen in einzelnen Zellen bewirken. Beim Durchqueren des Detektors lösen die Myonen einen elektromagnetischen Schauer aus. Auf diese Schauer oder Treffer im Myonsystem lässt sich der Trigger programmieren und Ereignisse aufzeichnen.

Diese Signalquelle liefert keine zur LHC-Clock synchronen Signale. Die kosmischen Myonen können aber bei niedrigen Energieschwellen  $O(1 \text{ GeV})$  verwendet werden, um bei wenigen Herz Ereignisrate den Trigger zu kalibrieren. Mit einzelnen Myonen, die den Detektor zentral durchqueren, lässt sich auch die Interfunktionalität der verschiedenen Komponenten des Detektors testen. In Tests zur stabilen Arbeitsweise des Detektors über einen längeren Zeitraum wird häufig ausschließlich auf kosmische Teilchen getriggert.

Ein Vorteil der Signale aus kosmischen Myonen ist, dass sich an ihnen die Gestalt von Kalorimetersignalen aus Proton-Proton-Kollisionen studieren lässt, da die Signallerzeugung ähnlich abläuft. Aufgrund der verschiedenen Richtungen und der Flugzeit der Myonen durch den Detektor sind diese Signale dagegen nicht geeignet, die Kanäle des Kalorimeter-Triggers genauer als zwei bis drei Strahlkreuzungen (50-75 ns) zu synchronisieren.

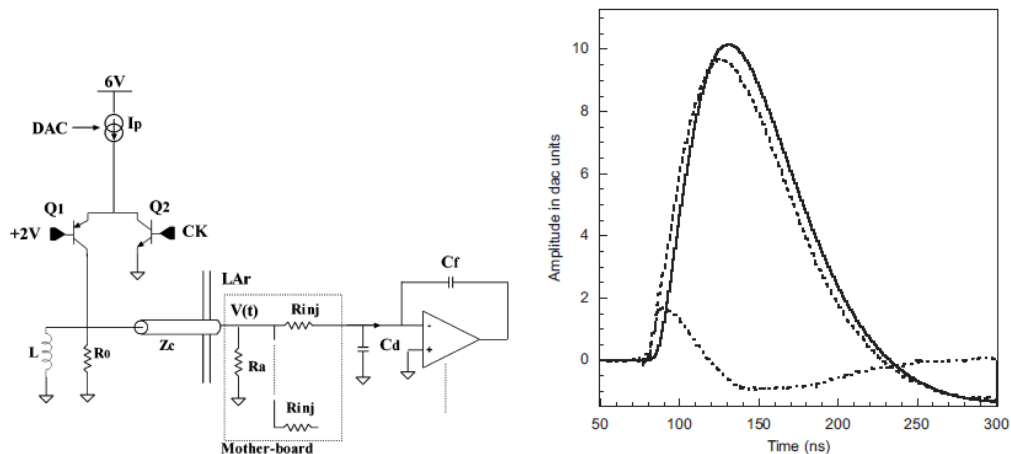
### Das Pulser- und Ladungsinjektionssystem

In beiden Kalorimetern lassen sich künstliche Pulse zur Kalibration in der Elektronik am Detektor erzeugen. Im LAr- und Tile-Kalorimeter existieren zwei leicht verschiedene Pulserysteme, die Spannungspulse in die Elektroden der Kalorimeter injizieren. Beide Systeme imitieren Pulse, wie sie in den Kalorimetern entstehen, bevor sie in der Front-End-Elektronik geformt werden.

Das LAr-Pulserystem erzeugt über einen Injektionswiderstand Spannungspulse an den Elektroden im Kryostat des LAr-Kalorimeters. Der Vorgang wird mit der sogenannten CALIB-Karte gesteuert. Diese Pulse simulieren die Signale der Ionisation im LAr-Kalorimeter.

Ein regelbarer DAC-Wert (Eng: Digital to Analogue Conversion) legt einen primären Gleichstrom  $I_p$ , wie in Abbildung 4.1 links zu sehen ist, fest, der eine Induktivität  $L$  magnetisch auflädt. Ein Widerstand  $R_0$  ist parallel zu der Induktivität geschaltet. Wird der Primärstrom durch eine Transistorschaltung gestoppt, so entsteht ein exponentiell abfallender Spannungspuls durch  $U_L - U_{R_0} = 0 \Rightarrow L\dot{I} + R_0I = 0 \Rightarrow I(t) = I_0 e^{-\frac{R}{L}t}$  an dem Widerstand. Der Spannungspuls wird an die Elektroden weitergegeben.

Die Amplitude des Signals, das in den Detektor gelangt, ist bis auf 0.25 % bekannt. Abbildung 4.1 rechts zeigt Beispielsignale aus Ladungsinjektionen für verschiedene DAC-Werte. Man sieht Pulse für DAC-Werte 0,10 und 500. Das Signal des DAC 500 Puls ist um den Faktor 50 unterdrückt dargestellt, um die lineare Abhängigkeit des Signals vom DAC-Wert zu verdeutlichen. Der kleine Puls ist ein parasitäres Signal, welches trotz DAC 0 durch Ströme in der Transistorschaltung entsteht.



**Abb. 4.1: (Links):** Schaltung zur Erzeugung von Spannungspulsen im LAr System [14]. **(Rechts):** LAr Kalibrationssignale [14] mit DAC-Werten 0 (klein), 10 und 500 (durchgezogen). Das DAC 500 Signal ist durch 50 geteilt.

Ein ähnliches Ladungsinjektionssystem steht dem Tile-Kalorimeter zur Verfügung. Es wird mittels eines präzisen DAC-Wertes ein Signal in der Kalorimerelektronik erzeugt. Über den gesamten beobachteten Bereich liegt durch nichtlineares Verhalten eine Ungenauigkeit von etwa 1% vor.

Durch Ladungsinjektionen ist es möglich im gesamten LAr- oder Tile-Kalorimeter gleichzeitig Pulssignale zu erzeugen. In beiden Kalorimetern werden die Signale über die Clock des Trigger Timing and Control (TTC) Systems synchronisiert. Dies ermöglicht es, die Kanäle des LAr- und Tile-Kalorimeters getrennt, aber auch die des Level-1 Kalorimeter-Trigger Pre-Prozessors auf Nanosekunden-Präzision relativ zueinander, zu synchronisieren. Da aber die Erzeugung und Auslese der Signale aus Kollisionen und Pulsersystemen mit unterschiedlichen Verzögerungen durch Lauf- und Flugzeiten verbunden sind, lässt sich mit dem Pulsersystem keine vollständige Synchronität für Datennahme mit Kollisionen herstellen.

## Das Tile-Lasersystem

Dem Tile-Kalorimeter steht zusätzlich ein Pulsersystem aus Nd:YVO4 Lasern zur Verfügung. Die Laser werden mit der TTC-Clock synchronisiert und senden Lichtpulse von 10 ns Dauer bei einer Wellenlänge von 532 nm über Kunststoff-Fasern an die Photokathoden.

Mit dem Lasersystem kann die Feinsynchronisation der einzelnen Zellen des Tile-Kalorimeters durchgeführt werden, wenn das Tile-Kalorimetersystem eigenständig auf die Laserpulse triggert. Für die Feinsynchronisierung des Kalorimeter-Triggers

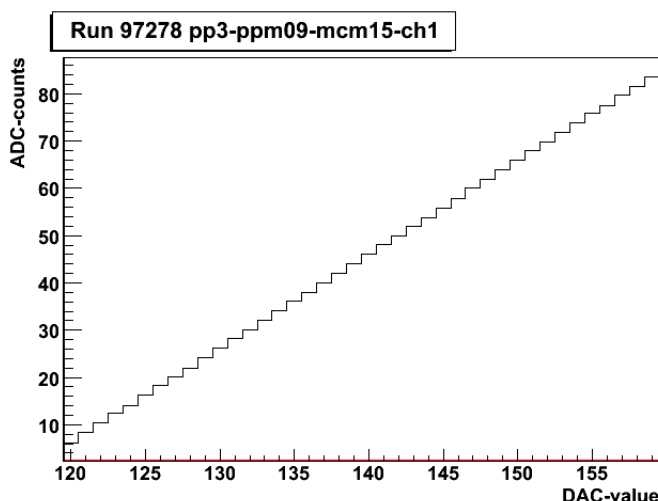
der ersten Stufe ist dieses System allerdings nicht geeignet, da die Laserpulse nicht synchron zur Clock des LHC erzeugt werden und daher im L1Calo Pre-Prozessor zeitlich springend erscheinen, wenn der L1Calo-Trigger den Trigger kontrolliert.

## 4.2 Kalibrationsruns

Es folgt eine Übersicht der Kalibrationsruns, die dem Kalorimeter-Trigger der ersten Stufe zur Verfügung stehen. In der Analyse der Daten, die während der den Runs aufgezeichnet werden, wird das Verhalten des Systems in Abhängigkeit der Steuerparameter der Elektronik ermittelt. Schließlich werden die Steuerparameter der Elektronik für eine gewünschte Einstellung des Systems in Datenbanken geschrieben.

### Der DAC-Scan

Der DAC ist ein digitaler Wert, der auf der Analogen-Eingangs-Karte der Pre-Prozessor-Module den Energiebereich festlegt, in dem die Kalorimetersignale digitalisiert werden (siehe Abschnitt 3.4). Genauer gesagt, legt der DAC-Wert die Spannung fest, bei der digitalisiert wird, wenn kein Signal vorliegt. Dieser Grundwert der Spannung bzw. der Digitalisierung wird als Pedestal (Eng.: pedestal = Podest, Sockel) bezeichnet.



**Abb. 4.2:** Erfolgreicher DAC-Scan eines EM-Trigger-Towers.

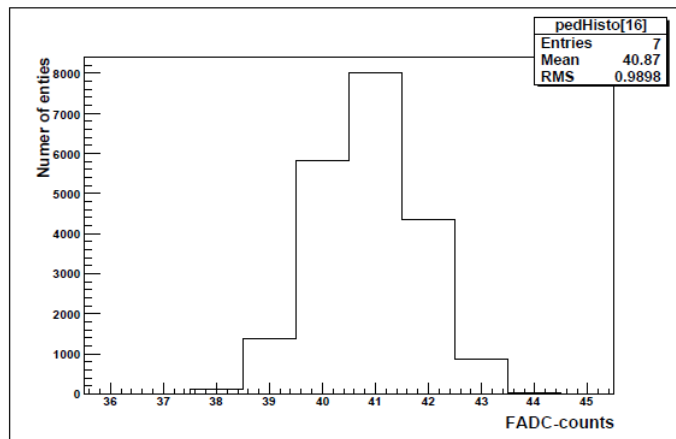
Im DAC-Scan wird der DAC Eingangswert über seine Größe von 8-Bit variiert. Die entsprechenden Werte der Digitalisierung durch die Analog-zu-Digital-Umwandler



auf den MCMs werden in ADC-Einheiten aufgezeichnet. Das Resultat eines DAC-Scans ist in Abbildung 4.2 für einen Kanal zu sehen. Es ergibt sich ein linearer Zusammenhang.

Der gesamte Bereich des DACs wird im DAC-Scan durchlaufen und jedem DAC-Wert das ADC-Mittel mehrerer ausgelesener Ereignisse zugeordnet, was dem Pedestal dieses DAC-Wertes entspricht. Diese Werte werden dann gegen den DAC-Eingangswert aufgetragen und anschließend wird das DAC/ADC-Verhältnis pro Kanal linear angepasst. Der Y-Achsenabschnitt und die Steigung der Geraden charakterisieren diesen Zusammenhang vollständig und werden mit einem Korrelationskoeffizienten zusammen in die Datenbank geschrieben. Je nach dem, wie gut sich das Verhältnis linear anpassen lässt, wird das Ergebnis pro Kanal als erfolgreich, kritisch oder fehlgeschlagen bewertet. Mit Hilfe dieses Zusammenhangs lässt sich dann der gewünschte Pedestal-Wert einstellen.

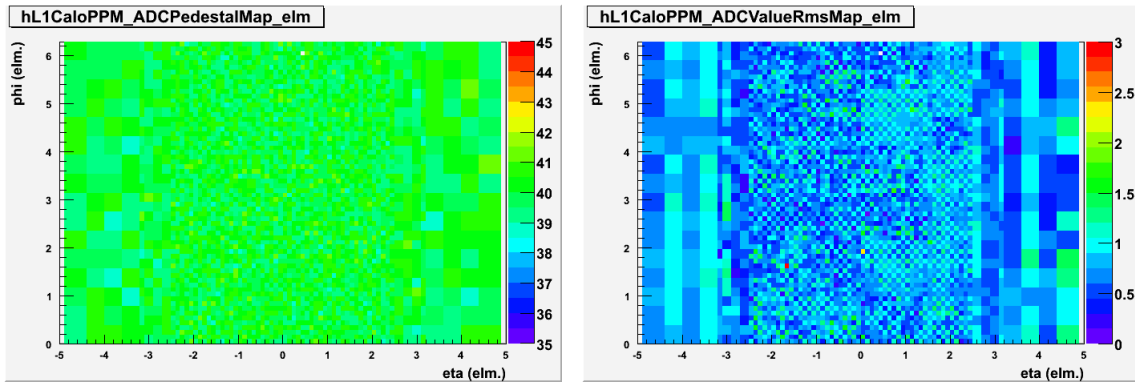
### Der Pedestal-Run



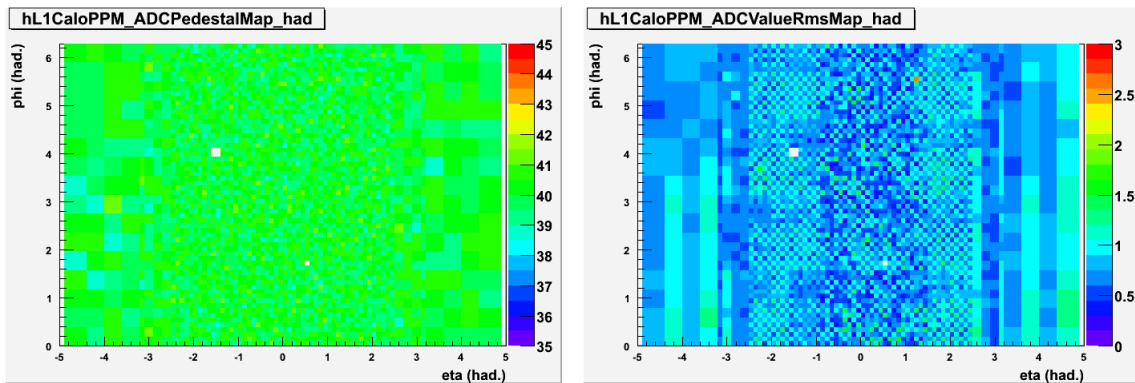
**Abb. 4.3:** Gesammelte FADC-Werte eines Trigger-Towers eines Pedestal-Runs [2].

In einem Pedestal-Run (Eng.: Podest, Sockel) werden für einen festen DAC-Wert Ereignisse ohne Pulse aufgezeichnet und der gemittelte ADC-Wert (Pedestal) für jeden Kanal des Pre-Prozessors bestimmt. Hierfür mittelt man über die gemessenen FADC-Werte und entscheidet anhand des Mittelwertes und der mittleren quadratischen Abweichung vom Mittelwert (RMS), ob der Lauf erfolgreich, kritisch oder misslungen ist.

Abbildung 4.3 zeigt die ADC-Werte eines Kanals während eines Pedestal-Runs in einem Histogramm. Die Pedestal-Werte wurden in der Inbetriebnahmephase vornehmlich auf einen Wert von 40 ADC-Einheiten festgelegt. Abweichungen des Mit-



**Abb. 4.4:** (**Links**): Pedestal-Werte des elektromagnetischen Kalorimeters des Pedestal-Runs 100393. (**Rechts**): Rauschen des EM-Kalorimeters desselben Runs, gegeben durch die Standardabweichungen der ADC-Werte.



**Abb. 4.5:** (**Links**): Pedestal-Werte des hadronischen Kalorimeters des Pedestal-Runs 100393 (**rechts**): Rauschen.

telwertes von etwa einer ADC-Einheit ( $\approx 244$  MeV) von 40, sowie eine Streuung von einer ADC-Einheit, sind dabei typische Ergebnisse. Die Präzision mit der das Pedestal festgelegt werden kann, wird durch das ADC/DAC-Verhältnis auf  $\pm 1$  ADC-Einheit bestimmt. Die Stärke des Rauschens hängt davon ab, ob die Receiver vor den PPMs Signale von den Kalorimetern erhalten ( $\pm 2.5$  ADC) oder nicht ( $\pm 1$  ADC).

Eine Ansicht der Ergebnisse eines Pedestal-Runs aller Pre-Prozessor-Kanäle geben die Abbildungen 4.4 für das EM-Kalorimeter und 4.5 für das hadronische Kalorimeter. In beiden Kalorimetern weichen nur wenige Kanäle um mehr als eine ADC-Einheit von der Vorgabe von 40 ADC-Einheiten ab. Das Rauschen als Standardabweichung vom Mittelwert in  $\eta - \phi$  aufgetragen, ergibt in beiden Kalorimetern ein Schachbrettmuster im zentralen Bereich. Je zwei der vier Kanäle eines MCM nehmen durch die Signalführung im MCM zusätzliches Rauschen auf. Die Kanäle des schwächeren Rauschens ergeben Werte zwischen  $\pm 0.5 - 1$  ADC-Einheit, während die anderen zwischen  $\pm 1 - 1.5$  ADC-Einheiten schwanken.

In zusätzlichen Tests wurde das Pedestal als konstant bestimmt. Daher wird im folgenden Abschnitt die Annahme  $\text{Pedestal} = 40 \text{ ADC Einheiten}$  für alle Kanäle des Pre-Prozessors gemacht.

## Der Phos4-Scan

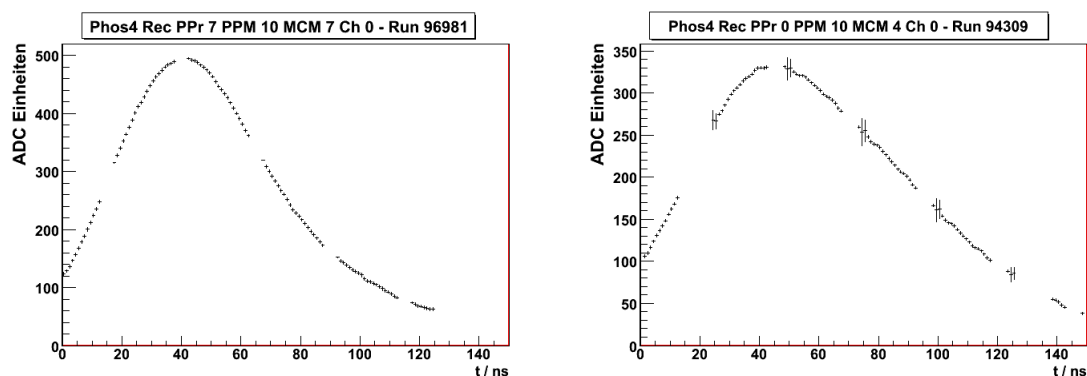
In einem Phos4-Scan wird die Referenz-Clock der Digitalisierung eines Pre-Prozessor-Kanals successive in Schritten von einer Nanosekunde gegenüber der Front-End-Elektronik verzögert und zeichnet Ereignisse mit Signalen der Pulversysteme auf. Die Bezeichnung „Phos4“ stammt von dem gleichnamigen Phos4-Chip auf dem MCM, der die Verzögerung der 4 Kanäle eines MCM steuert. Es ist so möglich die Digitalisierung des analogen Pulses mit der Präzision einer Nanosekunde zu verfolgen.

Es werden Signale mit dem Pulversystem synchron zur Clock der PPMs erzeugt und die Antwort des Pre-Prozessors aufgezeichnet. Der Wert, den man dem Phos4-Chip übergibt, entspricht einer ganzen Zahl zwischen 0 und 24, wobei jeweils eine Nanosekunde Verschiebung zwischen den Schritten liegt. Im folgenden Text wird diese Zahl als Phos4-Schritt bezeichnet und einzelne Phos4-Schritte mit einer Nanosekunde identifiziert.

Pro Phos4-Schritt zeichnet man etwa 30 ADC-Signale aus 5 ADC-Werten auf, zwischen denen ein Abstand von einer Strahlkreuzung von 25 ns liegt. Der nächste Phos4-Schritt erzeugt weitere 5 ADC-Werte, die das analoge Signal 1 ns später digitalisiert angeben. Für jeden Schritt des Phos4-Inkrementes werden ca. 30 Ereignisse aufgezeichnet und Mittelwerte aller 5 ADC-Werte gebildet. Durchläuft man alle Schritte und sortiert die nun 125 gemittelten ADC-Werte in der richtigen Reihenfolge, so lässt sich die Form des ursprünglichen analogen Signals, durch Datenpunkte mit je einer Nanosekunde Abstand, rekonstruieren. Der Vorgang der Rekonstruktion wird im Abschnitt 4.3 ausführlich behandelt.

Es lassen sich so die einzelnen Trigger-Tower bzw. deren Kanäle auf Anomalien der Signalform untersuchen oder eine Präzisionsnschronisation aller Kanäle durchführen, indem man den Phos4-Schritt so wählt, dass das analoge Signal im Maximum digitalisiert wird. Das Thema der Synchronisation ist der Gegenstand des Kapitels 5.

Abbildung 4.6 gibt ein Beispiel eines rekonstruierten Phos4-Signals aus dem Tile- und dem LAr-Kalorimeter. Die eingetragenen Werte sind gemittelte ADC-Einheiten mit der Standardabweichung des Mittelwerts als Fehler. Man erkennt einige Lücken im Signal im Abstand von je 25 ns. Während des Phos4-Scans kann es zu Problemen im DAQ-System kommen, durch die dann ein automatischer Stop der Datenaufzeichnung ausgelöst wird, während der Run fortgesetzt wird und deshalb der Phos4-



**Abb. 4.6:** (Links): Rekonstruiertes Phos4-Signal eines Tile-Kalorimeter-Trigger-Towers (rechts): Phos4-Signal aus dem LAr-Kalorimeter

Inkrement weiter erhöht wird. Da dies in der Vergangenheit mehrfach passierte, wurde der Phos4-Scan so verändert, dass die Skala von 0 bis 24 mehrfach durchlaufen wird, um so die Wahrscheinlichkeit zu reduzieren, dass Schritte ausgelassen werden.

Durch Rauschen oder nicht eindeutig einer Strahlkreuzung zugeordneten Ereignissen kann es während eines Phos4-Schrittes dazu kommen, dass ADC-Signale eine Strahlkreuzung zu früh oder zu spät digitalisiert werden. Für diese Schritte treten große Fehler in den gemittelten ADC-Werten auf, wie in Abbildung 4.6 rechts zu sehen ist.

Zu dem bereits erwähnten Phos4-Schritt gibt es noch einen weiteren Parameter. Es gilt festzulegen, an welcher Kante der Rechteck-Spannungskurve, die die Clock auf dem MCM definiert (Eng.: *leading Edge*), die digitale Information dem ASIC übergeben werden soll. Die Zuordnung der Datenpakete zu den Strahlkreuzungen ist nur über einen gewissen Bereich der 25 ns wohldefiniert. Verschiebt sich die Referenz der Digitalisierung gegenüber der Clock, die die Datenübergabe steuert, so kann die Zuordnung der Daten zur falschen Strahlkreuzung durch die Wahl der geeigneten Spannungskante verhindert werden. Die jeweils andere Spannungskante zu wählen, bedeutet, dass die Auslese um 12.5 ns versetzt wird. Die zu wählenden Einstellungen [15] sind in Tabelle 4.1 zusammengefasst.

Mit dem Phos4-Scan lässt sich für das gesamte Pre-Prozessorsystem Synchronität aller Kanäle mit Präzision von einer Nanosekunde herstellen. Allerdings erhält man dabei keine Synchronität für Signale aus Kollisionen, da man nur relativ zu den durch das Pulversystem erzeugten Signalen synchronisiert. Ermittelte man alle Flugzeiten, Laufzeiten und Verzögerungen der Teilchen bzw. deren Signalen in der Elektronik für sämtliche Kanäle, so ließe sich auf die Einstellungen für synchrones Triggern aller Kanäle korrigieren. Dennoch bliebe man blind gegenüber Zeitdifferenzen der Kanäle des Pulversystems. Um eine synchrone Datennahme auch für Signale aus Kollisionen

Phos4-Schritt	Ledging Edge
0-9	posEdge
10-21	negEdge
22-24	posEdge

**Tab. 4.1:** Phos4-Schritte und zugehörige Spannungskanten der Uhr des MCM zur sicheren Zuordnung der Daten an den ASIC. Die positive Kante der Rechteckspannung wird als posEdge und die negative als negEdge bezeichnet. Durch Über- oder Unterschreiten einer Schwellenspannung wird der nächste Clockschritt festgelegt.

zu ermöglichen, wird deshalb eine Alternative benötigt. Im nächsten Kapitel wird eine Methode entwickelt, die die Präzisions-Synchronisierung für den Kollisionsbetrieb übernehmen könnte.

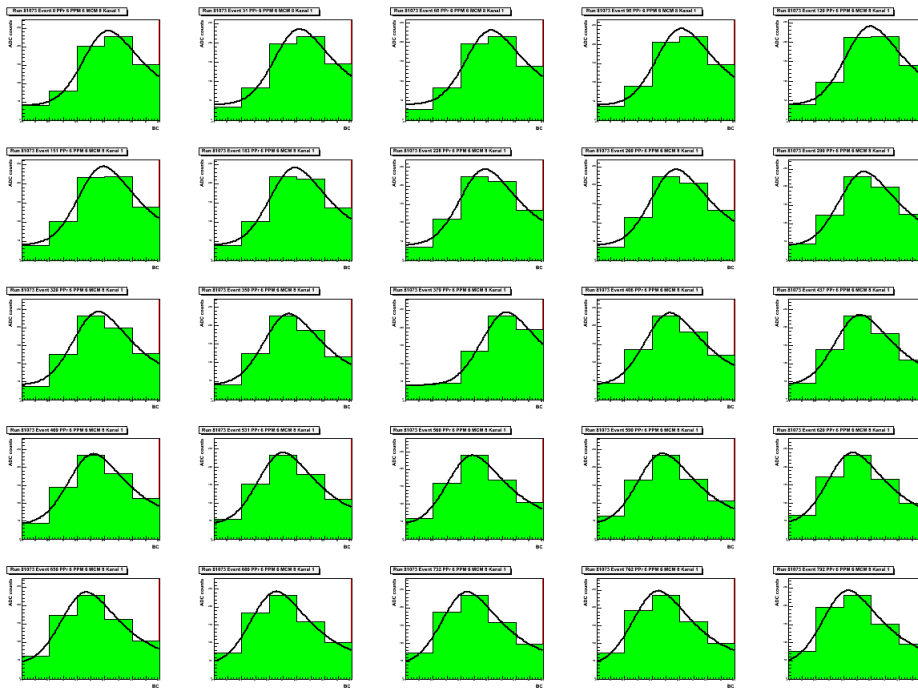
### Der Energy-Scan

Der Energy-Scan dient der Kalibration der Energiemessung auf Pre-Prozessor-Ebene. Dafür werden mit dem jeweiligen Pulsersystem Signale bekannter Energie des gesamten Spektrums in den Kalorimetern erzeugt. Die im Level-1 Kalorimetersystem durch die LUT-Werte gemessene Energie wird dann mit der in den einzelnen Kalorimeterzellen gemessenen Energie oder mit Signalen an den Receivern auf Unterschiede in der Kalibration verglichen.

## 4.3 Phos4-Signalrekonstruktion

Es soll nun die Rekonstruktion der Signale aus dem Phos4-Scan erläutert werden. Zu jeder der 25 Einstellungen des Phos4-Chips werden ADC-Signale mit je 5 ADC-Werten aufgezeichnet, die durch die Pulsersysteme synchron zur Pre-Prozessor-Clock erzeugte Signale enthalten.

Es gibt verschiedene Möglichkeiten den Level-1 Kalorimeter-Trigger zu betreiben. Einerseits kann der Level-1 Kalorimeter-Trigger eigenständig auf Ereignisse triggern, da der Pre-Prozessor mit der Signalerzeugung synchron arbeitet. Dabei kann man nach Belieben durch Nullsetzen der LUT-Werte verhindern, dass bestimmte Trigger-Tower zur Triggerentscheidung beitragen. Praktisch wird eine kleine Region gewählt, also z.B. ein einzelner Trigger-Tower, in der LUT-Werte ungleich Null entstehen können. Als eine weitere Möglichkeit, die allerdings nicht für Trigger im Kollisionsbetrieb vorgesehen ist, können die Kalorimeter über einen externen Trigger ein L1A zur Datenauslese generieren.

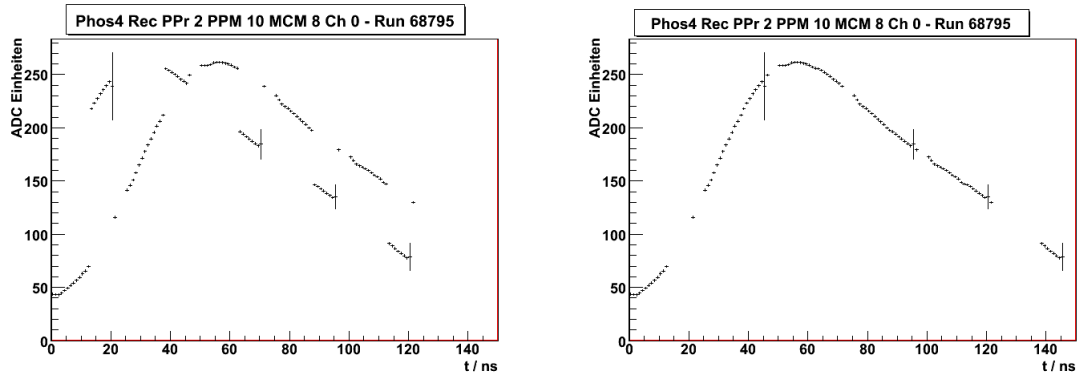


**Abb. 4.7:** Pulse aller Phos4-Schritte des Trigger-Towers im 1. Kanal des 3. MCMs des 4. PPMs im 6. Crate.

Die Pulsersysteme des Tile- und des LAr-Kalorimeter sind getrennt, sodass man entweder im LAr- oder im Tile-Kalorimeter Signale erzeugen kann. Mit den Pulsersystemen können, über einen DAC-Wert steuerbar, verschieden große Pulse generiert werden. Pro Kanal im Kalorimeter kann ein eigener DAC-Wert generiert werden. Dies wird verwendet, um die Korrekte Arbeitsweise des PPr-Systems über den gesamten Energiebereich zu testen oder um auf die Unterdrückung der gemessenen Transversalenergie in Bereichen großer Pseudorapidität zu reagieren.

Man erhält für alle 25 Phos4-Schritte einen Satz von ADC-Signalen. Die 5 ADC-Werte der Signale eines Schrittes werden individuell gemittelt. Die Standardabweichung vom Mittelwert wird als Fehler des gemittelten Wertes behandelt.

Falls der Datensatz alle Schritte enthält, existieren im Idealfall 125 gemittelte ADC-Werte, zwischen denen je eine Nanosekunde Unterschied in der Digitalisierung liegt. Ordnet man nun die Signale in der Reihenfolge 1. ADC-Wert aus Schritt 0, 1. ADC-Wert aus Schritt 1, ..., 1. ADC-Wert aus Schritt 24, 2. ADC-Wert aus Schritt 0, ..., 5. ADC-Wert aus Schritt 24 an, so erwartet man ein kontinuierliches Signal, ähnlich dem aus Abbildung 4.6. Leider ist dies nicht immer der Fall. Abbildung 4.7 zeigt für einen Trigger-Tower des Datensatzes des Runs 81073 Beispiele von ADC-Signalen aller Phos4-Schritte. Die an die Signale angepassten Gauss-Landau-



**Abb. 4.8:** (Links): Rekonstruiertes Phos4-Signal des LAr-Kalorimeters mit versetzten Schritten.(rechts): Das korrigierte Phos4-Signal.

Funktionen werden im nächsten Kapitel eingeführt und werden verwendet, um die Lage des ursprünglichen analogen Signals zu bestimmen.

Ein Beispiel eines Signals, welches wie oben angegeben, rekonstruiert wurde, ist in Abbildung 4.8 links zu sehen. Die ADC-Werte einiger Schritte sind gegenüber den anderen um 1 BC oder 25 ns verschoben. Dies ist ein Effekt, der global für alle Kanäle in denselben Phos4-Schritten auftritt. Dies lässt sich von Hand korrigieren, indem das Signal um eine Strahlkreuzung auf 150 ns erweitert wird und die entsprechenden Schritte um eine Strahlkreuzung verschoben werden (siehe Abb. 4.8 rechts).

Wodurch entsteht dieser Effekt und lässt er sich vorhersagen? Das Springen einzelner Schritte um ein BC wurde zuerst in Runs beobachtet, in denen bis auf eine Gruppe von 16 Trigger-Towern alle LUT-Werte gleich Null gesetzt wurden<sup>1</sup>. Dennoch tritt der Effekt auch in Runs mit nur einem einzelnen triggenden Kanal auf. Ein Effekt durch das Zusammenwirken mehrerer Trigger-Tower mit relativen Zeitdifferenzen unter 25 ns scheint daher ausgeschlossen. Zudem variiert auch die Zahl der versetzten Phos4-Schritte von Lauf zu Lauf. Dennoch bieten Runs mit nur einem Trigger-Tower stabilere Bedingungen für den Phos4-Scan. Es kann ebenfalls ausgeschlossen werden, dass dieser Effekt nur in solchen Runs auftritt, in denen nicht die korrekten Latching Edges der Rechteckspannung der Clock für die Datenübergabe an den ASIC der MCMs gewählt wurden. In den neuesten Datensätzen (Run 101357), in denen dieses berücksichtigt wurde, wird der Effekt weiterhin beobachtet. Es ist somit anzunehmen, dass hier das Zusammenwirken mehrerer Komponenten des Pre-Prozessors beobachtet wird.

Durch reine Datenauswertung scheint das Problem nicht lösbar zu sein. Der aktuelle Stand ist der, dass man per Hand den Quellcode zur Rekonstruktion der Phos4-Signale anpassen muss. Alternativ ließe sich auch ein Algorithmus entwickeln, der

<sup>1</sup>Die LUT-Werte werden verwendet, um damit die RoIs und das L1A zu ermitteln.

die gemittelten ADC-Werte sortiert. Aufgrund der Zahl der Sonderfälle, die zu berücksichtigen wären, ist dies noch nicht geschehen.

Im Anschluss an dieses Kapitel werden einige Beispiele von rekonstruierten Phos4-Signalen in den Abbildungen 4.9 bis 4.12 gegeben. Die Phos4-Signale werden im nächsten Kapitel wieder verwendet werden, um damit eine Kontrolle für die Ergebnisse der Methode zur Herstellung der Präzisionssynchronisation zu haben.

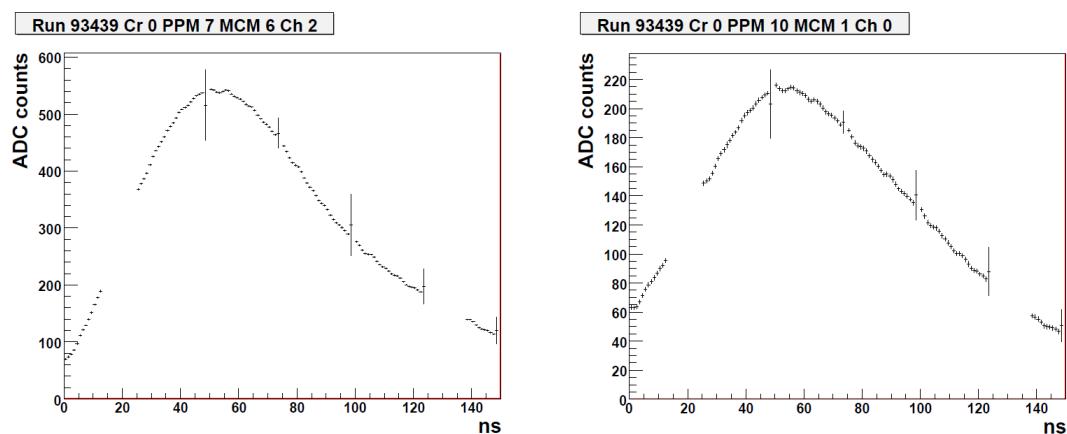


Abb. 4.9: (Links): Kanal 00070602 Run 93429 (rechts): Kanal 00100100 Run 93439

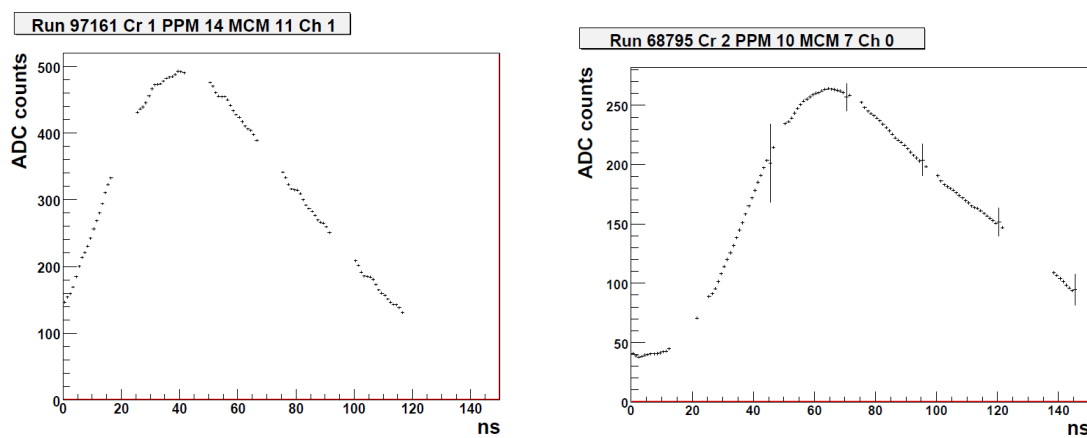


Abb. 4.10: (Links): Kanal 01141101 Run 97161 (rechts): Kanal 02100700 Run 68795



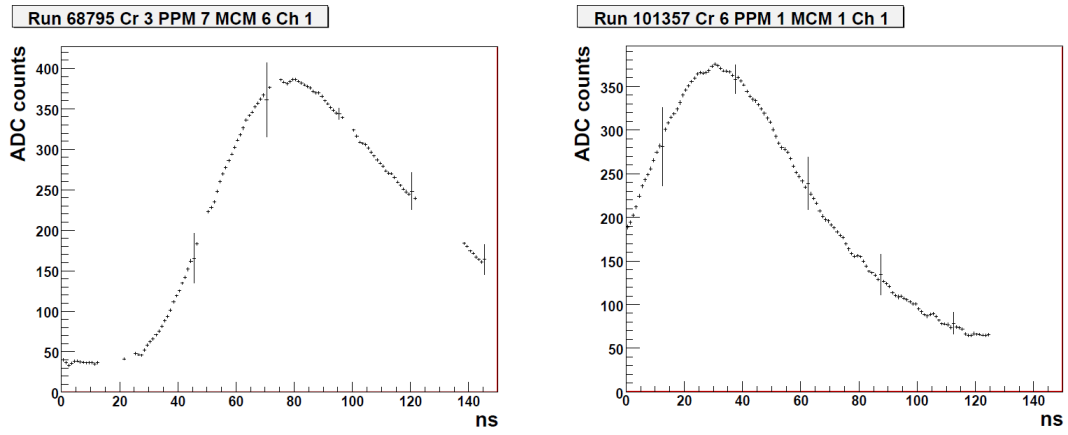


Abb. 4.11: (Links): Kanal 03070601 Run 69795 (rechts): Kanal 06010101 Run 101357

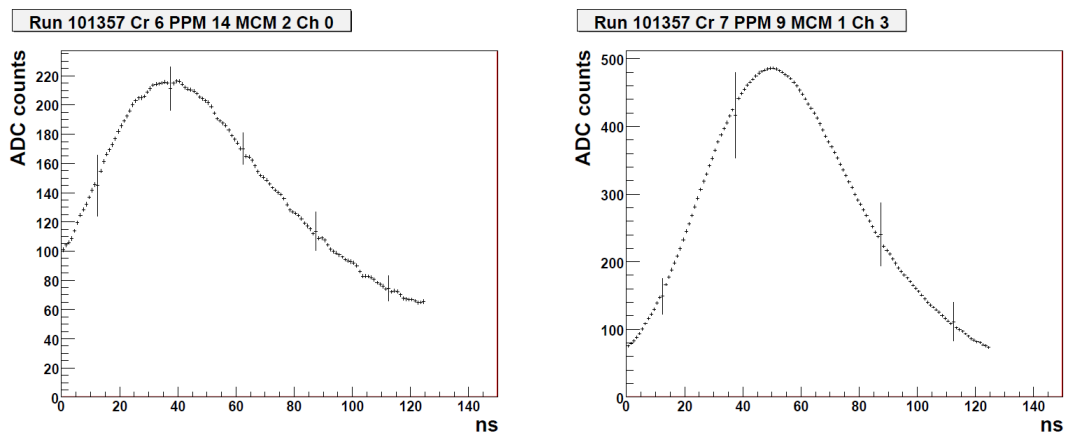


Abb. 4.12: (Links): Kanal 06140200 Run 101357 (rechts): Kanal 07090103 Run 101357



## 5. Synchronisation des Kalorimeter Triggers

In diesem Kapitel wird eine Methode beschrieben, die es ermöglicht, die einzelnen Kanäle des Pre-Prozessor Systems des Kalorimeter-Triggers der ersten Stufe mit einer Präzision im Nanosekunden-Bereich zu synchronisieren. Betrachtet werden digitale Signale des Pre-Prozessors (PPr) aus kosmischen Teilchen oder Ladungsinjektionen. Unter der Annahme uniformer analoger Pulse für jeden Kanal des PPr wird eine geeignete Funktion an die Signale angepasst. Dem Fit wird entnommen, in welche Richtung das Timing des Kanals korrigiert werden muss, damit das Maximum der ADC-Signale in möglichst guter zeitlicher Übereinstimmung mit dem analogen Maximum digitalisiert wird. Es wird gezeigt, dass die Methode geeignet ist, diese Synchronisierung mit ausreichender Präzision zu leisten, um sowohl die Zeitstabilität der Triggersignale, als auch eine hinreichend genaue Energiemessung zu garantieren.

### 5.1 Coarse- und Fine-Timing

Die Synchronisierung oder auch das Timing der Kanäle gibt die relativen Zeitunterschiede an, mit denen Signale derselben Strahlkreuzung im Pre-Prozessor-System verarbeitet werden. Die Ursachen unterschiedlichen Timings der verschiedenen Pre-Prozessor-Kanäle liegen zum Beispiel an den bis zu 30 m verschieden langen Kabeln, die die analogen Signale zu den Pre-Prozessoren leiten, den nicht völlig identischen Signalwegen in der Elektronik oder dem Zeitpunkt der Weitergabe der Daten an das nächste Modul aus einem Zwischenspeicher. Im Pre-Prozessor werden die Kalorimetersignale im 40 MHz Takt digitalisiert. Dabei ist es für jeden Kanal individuell möglich das Timing um Vielfache des Strahlkreuzungsabstandes durch Versetzen des Auslesezeigers an den 16 BC tiefen FIFOs oder um einzelne Nanosekunden durch den Phos4-Chip zu korrigieren. Aber auch wenn alle Signale derselben Strahlkreuzung Zeitunterschiede von unter 1 BC aufweisen, werden diese Differenzen dafür sorgen, dass auf Pre-Prozessor-Ebene nicht zwingend alle Signale desselben BC ihr Maximum im selben BC erreichen. Es gilt gute Synchronisierung für alle Kanäle des Pre-Prozessors zu bestimmen und somit alle Kanäle relativ zueinander bis auf eine Strahlkreuzung festzulegen.

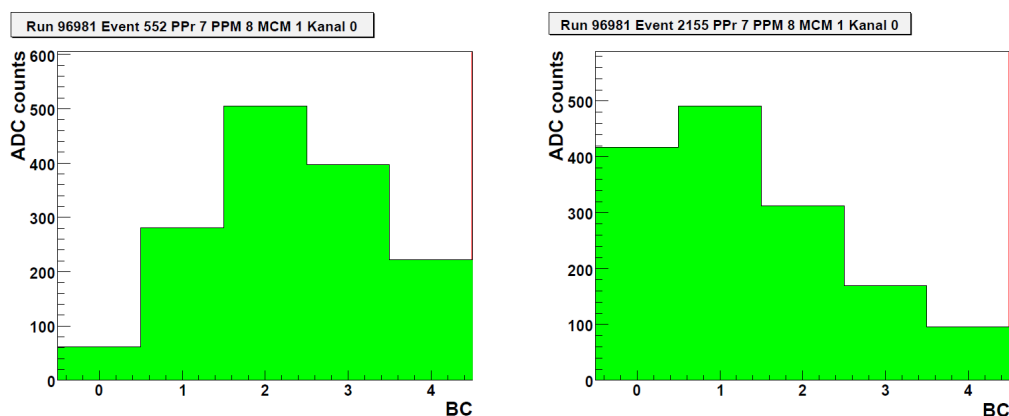
Die Folgen schlechter Synchronität sind: Auslösen des Triggers auf den falschen 40 MHz Takt und damit verbunden, Springen des Triggers um das richtiger BC. Eine weitere Folge ist ein noch abzuschätzender Energiefehler, durch Digitalisierung außerhalb des Maximums des analogen Signals und der daher zu gering ausfallenden

Energiemessung. Es werden zunächst zwei Begriffe eingeführt, die die Synchronisation der Pre-Prozessor-Kanäle auf groben Zeitskalen oberhalb des Zeitabstandes einer Strahlkreuzung oder eines Bunch Crossings (BC) von 25 ns und die Präzisionssynchronisation mit Nanosekunden-Genauigkeit beschreiben.

### Coarse-Timing

Als Coarse-Timing oder Grobsynchronisierung bezeichnet man die Synchronisation der Pre-Prozessor-Kanäle des Kalorimeter-Triggers der ersten Stufe (L1Calo) auf 1 BC oder 25 ns Präzision. Im Pre-Prozessor werden die Kalorimetersignale zur Triggerentscheidung des L1Calo Triggers im 40 MHz oder Strahlkreuzungs-Takt digitalisiert und prozessiert. Die Signaldauer im LAr-Kalorimeter liegt bei 500 ns, im Tile-Kalorimeter um 150 ns. Die Signale beider Kalorimetertypen werden in der Detektorelektronik oder an den Receivern vor dem Pre-Prozessor-System so geformt, dass der eigentliche Puls des Signals auf einen Zeitraum von etwa 150 ns beschränkt ist. Daher ist es aus Sicht des Pre-Prozessors bei der Datennahme ausreichend, einen Ausschnitt von 3-7 ADC-Werten aufzuzeichnen.

Alle Datensätze, die in dieser Arbeit verwendet werden, enthalten ADC-Signale aus 5 ADC-Werten. Somit decken die betrachteten Signale einen Zeitraum von 100 ns Dauer ab. Die einzelnen ADC-Werte werden immer in ADC-Einheiten angegeben. Die Höhe des Maximums des ADC-Signals ist proportional<sup>1</sup> zur gemessenen Energie des jeweiligen Trigger-Towers. Es ist wichtig, dass die Digitalisierung der Pulse derselben Strahlkreuzung in allen Kanälen synchron stattfindet und der Puls der Signale zeitlich zentriert erfasst wird, damit die gemessene Energie der richtigen Strahlkreuzung zugeordnet werden kann.



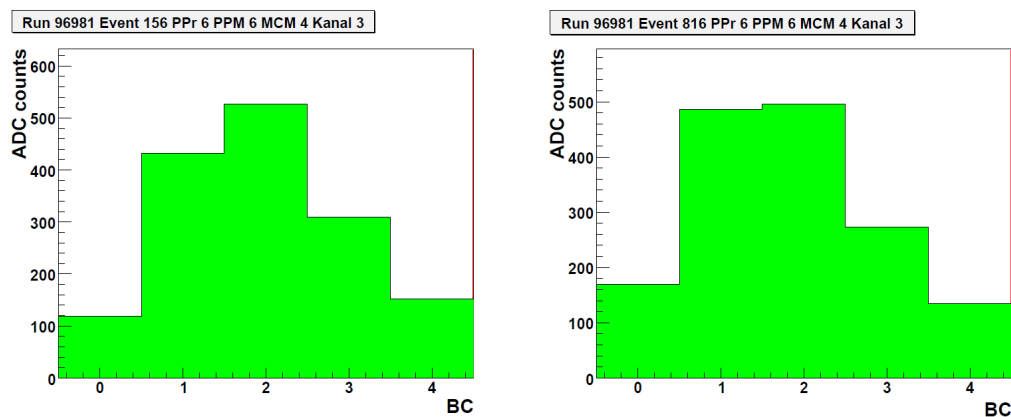
**Abb. 5.1:** (Links): Gutes Coarse-Timing: ADC-Signal eines hadronischen Trigger-Towers, (rechts): um ein BC zu früh getriggertes Ereignis.

<sup>1</sup>Das Pedestal ist zusätzlich zu subtrahieren.

Die 5 Einträge der ADC-Signale werden von links nach rechts mit 0-4 nummeriert, wobei 0 dem frühesten ADC-Wert entspricht. Befindet sich das Maximum im mittleren Eintrag des Histogramms, so liegt für diesen Kanal gute Grobsynchronisierung vor. Dies wird im Folgenden als gutes Coarse-Timing (Eng.: coarse = grob) bezeichnet. Befindet sich das Maximum dagegen außerhalb, so wird von um  $n$  BCs zu spätem oder zu frühem Coarse-Timing gesprochen. „Zu früh“ entspricht Signalen, deren Maximum auf der Zeitachse nach rechts verschoben erscheint, „zu spät“ entsprechend nach links verschoben. Dabei bezieht man sich auf das jeweils betrachtete ADC-Signal, für das die Triggerentscheidung zu früh oder zu spät kam. Zudem wanderte das Maximum von rechts nach links, wenn man für aufeinanderfolgende Strahlkreuzungen das Signal aufzeichnete. Abbildung 5.1 zeigt links ein Beispiel eines ADC-Signals für gutes Coarse-Timing und rechts einen Puls eines um eine Strahlkreuzung zu früh aufgezeichneten Ereignisses.

### Fine-Timing

Die Synchronisierung der Pre-Prozessor-Kanäle mit Nanosekunden-Präzision wird als Präzisionssynchronisierung oder Fine-Timing bezeichnet. Die Signale der Trigger-Tower werden nach, durch den Beschleuniger vorgegebenen, Clocks mit 40 MHz digitalisiert. Dieser Prozess ist pro Kanal durch den Phos4-Chip auf den MCMs um einzelne Nanosekunden verschiebbar (siehe Kapitel 4). Die Digitalisierung des Kanals kann mit diesem auf eine Nanosekunde auf das Maximum des analogen Signals abgestimmt werden. Abweichungen von  $O(1\text{ BC})$  werden zunächst durch grobe Korrekturen in Schritten von 25 ns korrigiert.



**Abb. 5.2:** (**Links**): had. ADC-Signal mit klar isoliertem Maximum, (**rechts**): schlechtes Fine-Timing. Auch wenn der Unterschied mit  $\Delta\text{ADC} > 20 \gg \text{ADC-Rauschen} \approx 4 \text{ ADC}$ .

Hierzu ebenfalls zwei Beispiele von ADC-Signalen. In Abbildung 5.2 sehen wir links ein Signal, in dem das digitale Maximum klar größer als die benachbarten ADC-

Werte ist und vermutlich das analoge Signal nahe dem Maximum digitalisiert wurde. Rechts ein Beispiel eines weniger ausgeprägten Maximums, bei dem sich das analoge Maximum zwar im mittleren BC befand, aber an der Grenze zum benachbarten ADC-Wert. Ist der Unterschied zwischen zwei benachbarten ADC-Werten kleiner als das Rauschen der ADC-Werte von ungefähr 3 ADC-Einheiten, so ist es möglich, dass dieses Signal der 25 ns früheren Strahlkreuzung zugeordnet wird. Um präzisere Aussagen zum Timing treffen zu können, benötigt man Kenntnis des Timings des Maximums des analogen Signals.

Aus solchen Unterschieden des Timings auf Nanosekunden-Skala ergeben sich Konsequenzen für die Stabilität und die Energiemessung des Level-1 Kalorimeter-Triggers. Die ADC-Werte sind durch die Kalorimeter mit einem Rauschen von ca. 3 ADC-Einheiten belastet. Betrachtet man Abbildung 5.2 rechts, so besteht die Möglichkeit, dass das Maximum in einigen Ereignissen durch Rauschen zum benachbarten, fast gleich hohen ADC-Wert wandert. Ist dieser Trigger-Tower dann an der Triggerentscheidung beteiligt, so wird der Trigger instabil und das L1A des CTPs kann eine Strahlkreuzung früher oder später ausgelöst werden. Die Energiemessung des Triggers wird ebenfalls durch schlechtes Fine-Timing beeinflusst. Geht man von einem ausgeprägten Maximum der analogen Signale aus, so wird eine geringere Energie gemessen, als eigentlich deponiert wurde, wenn das ADC-Maximum zeitlich versetzt zum analogen digitalisiert wird. Wie groß der Unterschied tatsächlich ist, wird zum Gegenstand späterer Untersuchungen. Dies begründet, warum es für den ATLAS-Kalorimeter-Trigger der ersten Stufe von Interesse sein muss, das System auf  $O(\text{ns})$  genaue synchronisieren zu können. Anschließend wird eine Methode entwickelt, um Synchronität der Pre-Prozessor-Kanäle herstellen zu können.

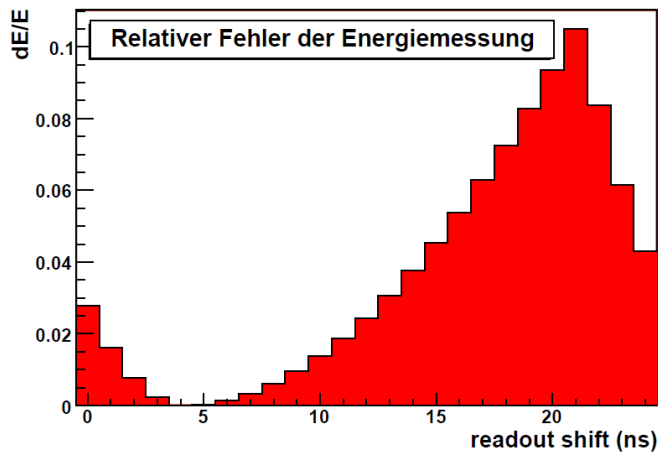
## 5.2 Motivation der Fit-Methode

### Motivation

Um den Aufwand zu rechtfertigen, dass man sich um eine alternative Methode zum Phos4-Scan (siehe Abschnitt 4.3) bemüht, um Fine-Timing bestimmen zu können, muss man sich vergegenwärtigen, dass der Phos4-Scan auf Signale aus Kollisionen angewendet nicht sinnvoll ist und somit stark limitiert ist. Der Phos4-Scan bestimmt Fine-Timing Korrekturen, indem aus Pulsen aus Ladungsinjektionen mit Hilfe des Phos4-Chips ein genaues Bild der Signale rekonstruiert und das Maximum abgelesen wird. Allerdings sind Kalorimetersignale aus Kollisionen nicht in Phase mit denen aus den Pulsersystemen, sodass die Feinabstimmung für synchrone Datennahme mit den Pulsersystemen nicht für die synchrone Datennahme aus Proton-Proton-Kollisionen übernommen werden kann.

Man muss also das Fine-Timing für Kollisionen mit Daten aus Kollisionen ermitteln. Allerdings ist der Phos4-Scan nicht anwendbar auf Daten mit Kollisionen, da die Signale zwar synchron zur LHC Uhr entstehen, aber nicht von konstanter Pulshöhe sind. Statt dessen ist man gezwungen, einen Weg zu finden, aus einzelnen ADC-Signalen Korrekturen zu ermitteln.

Eine weitere Folge schlechten Fine-Timings ist ein Fehler in der Energiemessung des Pre-Prozessors. Die Höhe des ADC-Maximums ist proportional zur Energie, die in der Region eines Trigger-Towers des PPr im Kalorimeter deponiert wurde. Es entsteht eine Abweichung zwischen der gemessenen und der eigentlich deponierten Energie, wenn das Maximum des analogen Signals nicht zeitlich exakt digitalisiert wird. In Abbildung 5.3 ist das Ergebnis einer Simulation zu dem so entstehenden



**Abb. 5.3:** Der relative Fehler in der Energiemessung ist als Funktion des Punktes der Digitalisierung in Schritten von Nanosekunden aufgetragen. Das analoge Maximum befindet sich im Minimum. Das zugrunde liegende ADC-Signal wurde mit einer Gauss-Landau-Funktion, die die Pulse des Tile-Kalorimeters beschreibt, angepasst.

Fehler gezeigt. Der relative Fehler der Energiemessung eines Kanals durch schlechtes Fine-Timing ist als Funktion der Digitalisierung, in Schritten von je 1 ns Abstand, aufgetragen. Das analoge Signal wird mit Hilfe einer Funktion simuliert, die aus einer Gauss- und einer Landau-Kurve kombiniert ist (siehe Abschnitt 5.2). Liest man nun einen Wert der Funktion ab, so entspricht dies der Digitalisierung des analogen Signals an diesem Zeitpunkt. Die  $\Delta E/E$ -Werte ergeben sich durch sukzessives Verschieben der Ablesepunkte der Gauss-Landau-Funktion in der Nähe des Maximums um je eine Nanosekunde.

Der relative Fehler ergibt sich aus der Differenz der abgelesenen ADC-Werte und des Maximums der Funktion, geteilt durch den Wert des Maximums der Funktion. Es existiert ein klares Minimum, welches der idealen Feinsynchronisation entspricht. Das Maximum gestattet eine Genauigkeit von etwa  $\pm 5$  ns, falls man eine Präzision von 2 % in der Energiemessung fordert. Zudem sieht man, dass der maximale Fehler bei ca. 10 % liegt.

Um das ideale Fine-Timing für einen Kanal festlegen zu können, benötigt man nur

die Position des Maximums des analogen Signals. Mit Hilfe einer Funktion, die die Signalform ausreichend genau beschreibt und die Position des Maximums als freien Parameter besitzt, kann man durch einen Fit die Position ermitteln. So ist man in der Lage, auf den Abstand zum zentrierten Maximum zu korrigieren und die Pre-Prozessor-Kanäle mit Nanosekunden-Genauigkeit zu synchronisieren. Es folgt eine Beschreibung der Funktion, die verwendet wird, um die ADC-Signale anzupassen.

### Die Gauss-Landau-Funktion

Bei der Gauss-Landau-Funktion handelt es sich um eine Kombination aus einer Gauss-Funktion, welche den ca. 50 ns dauernden ansteigenden Teil des Signals (linker Teil) bis zum Maximum beschreibt, und einer Landau-Funktion, die das langsamer abfallende Ende des Pulses wiedergibt. Es wurde bereits gezeigt, dass die Gauss-Landau-Funktion die Pulsform der Trigger-Tower-Signale des Tile-Kalorimeters aus dem Ladungsinjektionssystem beschreibt [16]. Die Funktion ist durch die Formeln 5.1 und 5.2 definiert.

$$f(x \leq x_{max}) = A \exp \left\{ -\frac{(x - x_{max})^2}{2\sigma_{Gauss}^2} - \frac{1}{2} \right\} + C \quad (5.1)$$

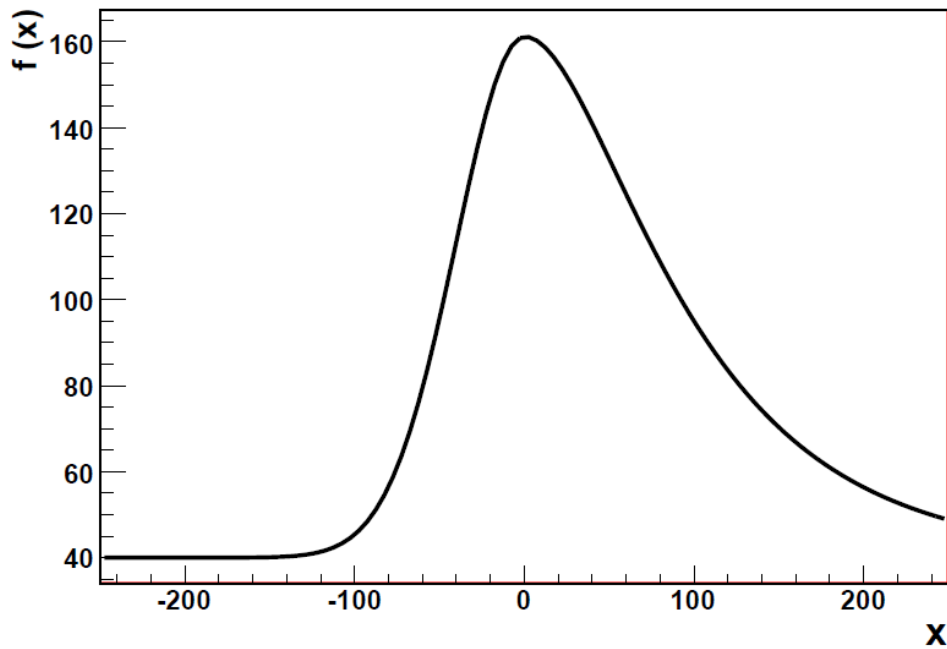
$$f(x > x_{max}) = A \exp \left\{ -\frac{1}{2} \left( \frac{x - x_{max}}{\sigma_{Landau}} + e^{-\frac{x - x_{max}}{\sigma_{Landau}}} \right) \right\} + C \quad (5.2)$$

Definition der Gauss-Landau-Funktion

Es gibt 5 freie Parameter. Die Amplitude  $A$ , die Position des Maximums  $x_{max}$ , sowie die zwei Breiten des ansteigenden und des abfallenden Endes  $\sigma_{Gauss}$  und  $\sigma_{Landau}$  und eine konstante  $C$ . Die Amplitude ist proportional zur gemessenen Energie, die Position des Maximums setzt den Punkt für ideales Fine-Timing. Die Breiten bestimmen die Breite des Pulses, die Konstante  $C$  entspricht dem konstanten Pedestal.  $\sigma_{Gauss}$  bestimmt die Breite der ansteigenden Flanke links in allen dargestellten Signalen,  $\sigma_{Landau}$  den abfallenden Teil. Der Term  $-\frac{1}{2}$  im Exponenten der Gauss-Funktion ist so gewählt, dass die beiden Funktionen im Maximum verbunden werden. Die Landau-Funktion fällt langsamer als eine Gauss-Funktion. Sie nähert sich exponentiellem Abfall an.

Der Pedestal-Wert wird in den folgenden Abschnitten der ADC-Signale nicht als freier Fit-Parameter betrachtet, da im Laufe der Arbeit das Pedestal konstant bei 40 ADC-Einheiten lag. Werden im Folgenden ADC-Signale betrachtet, so wird immer stillschweigend das Pedestal abgezogen. Allerdings wird in Fits der rekonstruierten





**Abb. 5.4:** Gauss-Landau-Funktion mit Maximum im Nullpunkt, einem konstanten Faktor von 200 und breiten  $\sigma_G$  und  $\sigma_L$  von je 40.

Phos4-Signale das Pedestal weiterhin als freier Parameter behandelt, da dieser die Fit Qualität verbessert. Betrachtete man pro Kanal individuelle Pedestal-Werte und korrigierte auf Abweichungen von dem eingestellten Wert, so ließen sich die Ergebnisse dieser Studien verbessern. Allerdings implizierte dies, dass man für jeden zu betrachtenden Datensatz auch die vorausgegangenen Pedestal-Runs auswerten müsste. Zudem würde dies nur zu geringen Korrekturen führen, da die Pedestal-Werte im Laufe der Zeit stabil sind [17].

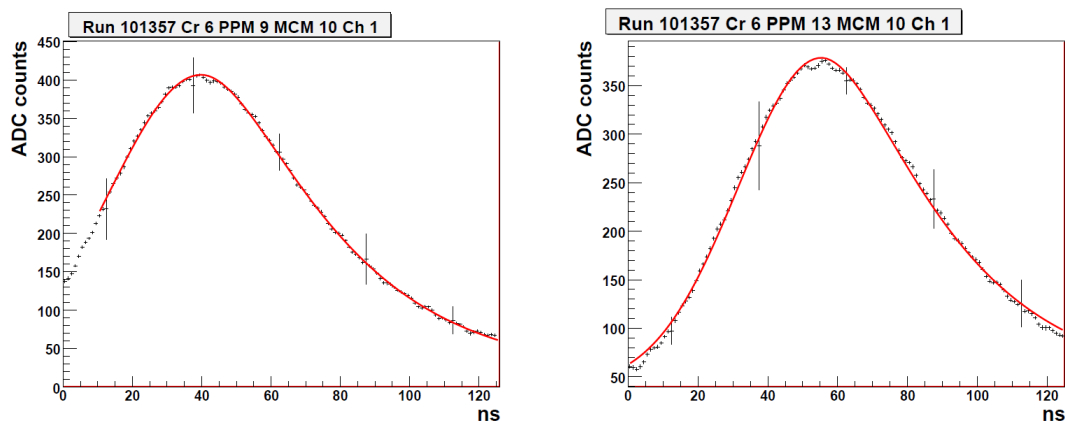
Es erscheint nicht sinnvoll ADC-Signale, bestehend aus 5 Werten mit einer Funktion mit 4 Parametern anzupassen. Die Eigenschaften des Fits wurden jedoch in einer Simulation studiert und es wird später erläutert, wie die Zahl der freien Parameter sich reduzieren lässt. In Abbildung 5.4 wird ein Beispiel einer Gauss-Landau-Funktion gezeigt. Anschliessend sind in den Abb. 5.5-5.8 einige mit 5 freien Parametern angepasste Signale aus Phos4-Scans des Tile- und des LAr-Kalorimeters zu sehen.

### 5.3 Simulationen zur Genauigkeit der Fit-Methode

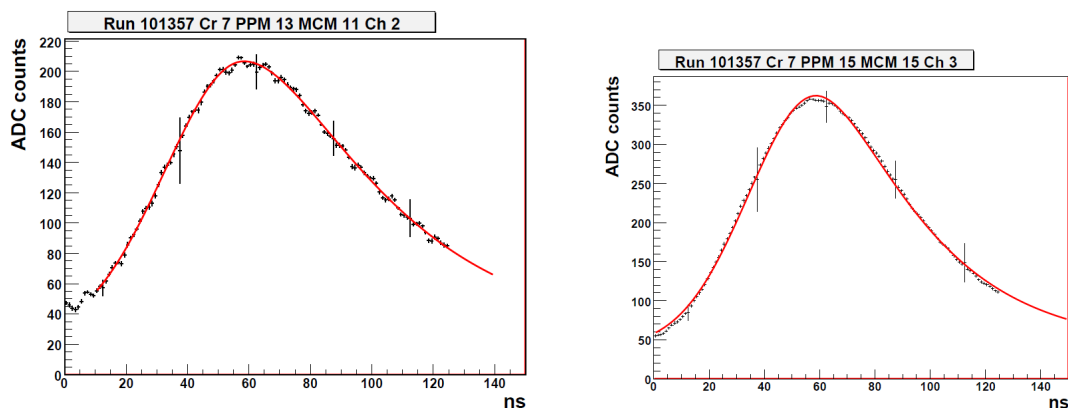
#### Simulation

In dieser Studie wird die zu erwartende Genauigkeit der Fit-Methode simuliert. Mithilfe von Gauss-Landau-Funktionen wird der Digitalisierungsprozess auf den Pre-Prozessor-Modulen nachgestellt. Die Gauss-Landau-Funktionen werden hierzu an Signale aus Ereignissen mit kosmischen Myonen angepasst, um als realistische analoge Signale behandelt werden zu können. Mithilfe dieser wird schließlich die Digitalisierung nachgestellt.

Zuerst wird die Gauss-Landau-Funktion an 5 Punkten, im Abstand von einer Strahlkreuzung abgelesen. Die 5 Werte werden in ein Histogramm gefüllt und ergeben

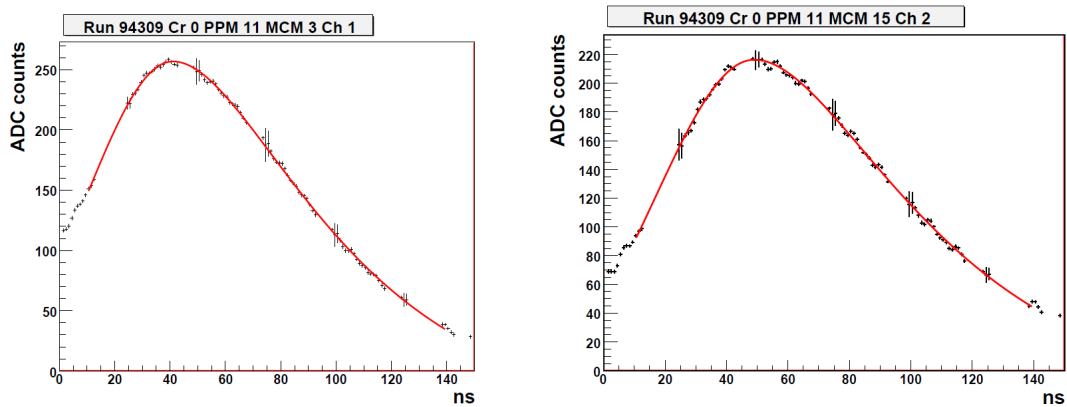


**Abb. 5.5:** (**Links**): In einem 5-Parameter-Fit einer Gauss-Landau-Funktion angepasstes Phos4-Signal des Tile-Kalorimeters, (**rechts**): Tile-Kalorimeter-Signal.

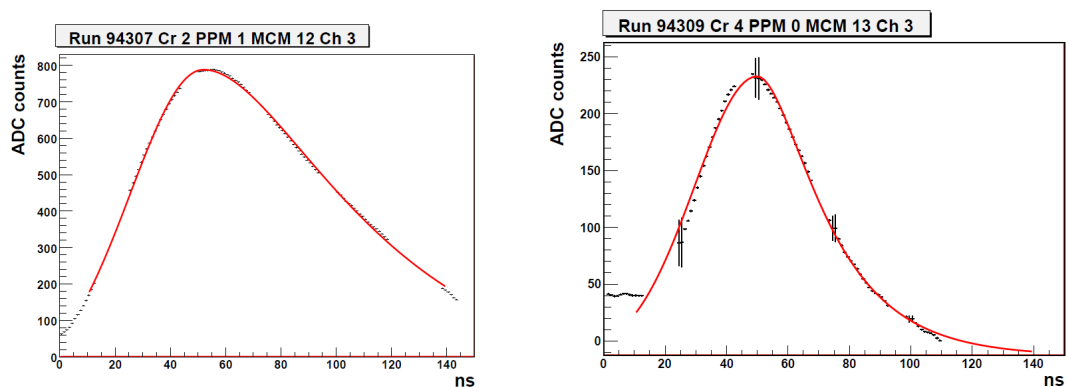


**Abb. 5.6:** (**Links**): In einem 5-Parameter-Fit einer Gauss-Landau-Funktion angepasstes Tile-Kalorimeter Phos4-Signal, (**rechts**): Tile-Kalorimeter-Signal.

so ein simuliertes digitales ADC-Signal als ersten Datensatz. Als nächstes wird der Ablesepunkt der Funktion um eine Nanosekunde verschoben, so dass das Signal später, also die Kurve weiter rechts ausgelesen wird. Man erstellt ein Histogramm mit den 5 Werten usw. Diesen Prozess durchläuft man insgesamt 25 Mal und erhält so 25 Datensätze aus Histogrammen, mit je einer Nanosekunde Zeitunterschied in der simulierten Digitalisierung. Verschiebt man den Ablesepunkt der Gauss-Landau-Funktion um eine Nanosekunde, so entspricht dies der Erhöhung des Phos4-Schrittes um eins (siehe 4.2 und 4.3). Abbildung 5.9 zeigt 25 ADC-Signale, die auf diese Weise simuliert wurden. Für den nächsten Abschnitt wurden die Signale mit einem Fit belegt. Man erkennt, wie sich die Form des digitalen Signals verändert, insbesondere, wie das Maximum sich zu den benachbarten ADC-Werten verschiebt und langsam nach links wandert.

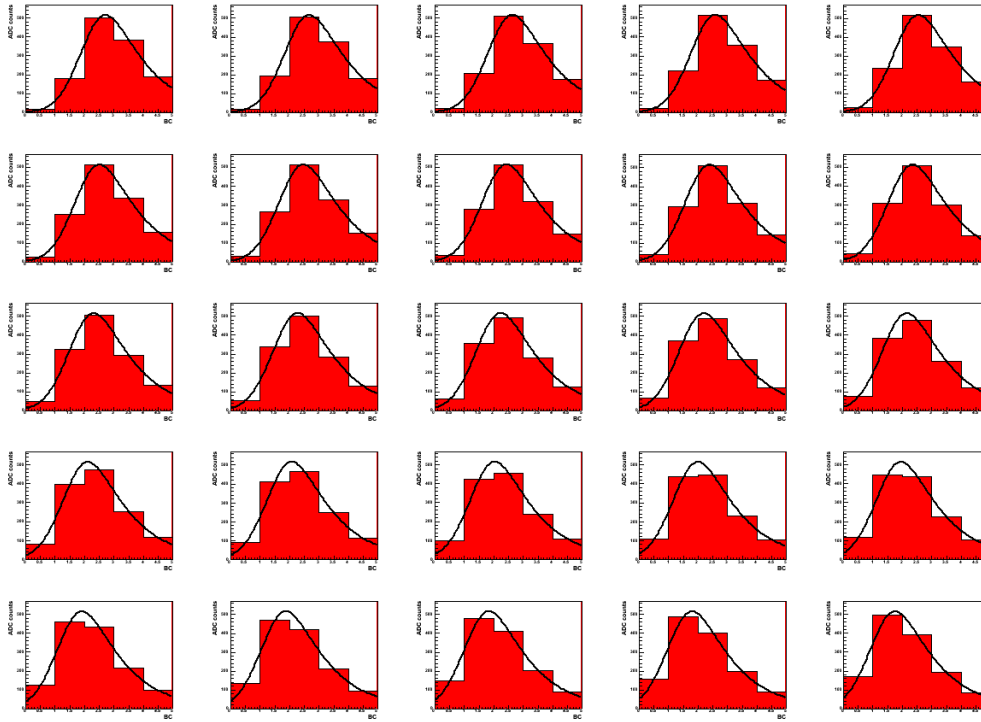


**Abb. 5.7:** (Links): In einem 5-Parameter-Fit einer Gauss-Landau-Funktion angepasstes LAr-Kalorimeter Phos4-Signal, (rechts): LAr-Kalorimeter-Signal.



**Abb. 5.8:** (Links): Angepasstes LAr-Kalorimeter-Phos4-Signal der Endkappe, (rechts): LAr-Kalorimeter-Signal aus dem FCal. Man beachte das schmale Signal und die Unterschreitung des Pedestal Niveaus. Das Pedestal und der Fit-Bereich mussten variiert werden, um sinnvollen Fit zu erhalten.

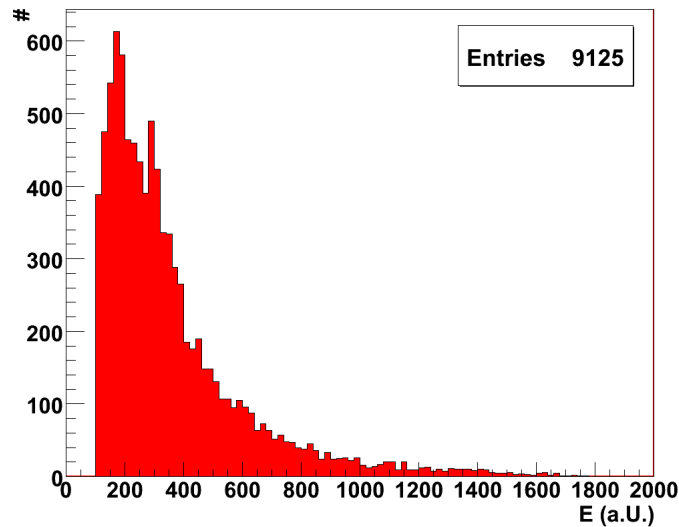
Im nächsten Schritt werden die beschriebenen 25 digitalen Signale verwendet, um das Anpass-Verhalten der Gauss-Landau-Funktion in Abhängigkeit von der Feinabstimmung der Digitalisierung zu untersuchen. Für die Präzisions-Synchronisation ist es entscheidend, dass die Fit-Funktion unabhängig vom Zeitpunkt der Digitalisierung das ursprüngliche Signal wiedergibt. Insbesondere die Maximums-Position des angepassten Signals muss der der Digitalisierung folgen. Weiterhin bietet dies eine Möglichkeit, den Fehler der Energiemessung durch ungünstiges Fine-Timing abzuschätzen.



**Abb. 5.9:** Simulierte ADC-Signale, beginnend oben links nach rechts verschiebt sich der Punkt der Digitalisierung um Schritte von 1 ns.

In dieser Studie werden analoge Signale simuliert, indem ADC-Signale kosmischer Teilchen, also Myonen, angepasst werden. Die entstehende Funktion wird als Signal verwendet, um damit die Digitalisierung wie oben beschrieben durchzuführen. Ein Vorteil der Signale kosmischer Myonen ist, dass die Methode über das gesamte Energiespektrum, bis zur Sättigung der ADC-Energie-Skala bei 1023 ADC-Einheiten (Für Receiver Gain 1 :  $1023 \cdot 244 \text{ MeV} \approx 250 \text{ GeV}$ , abzüglich Pedestal von etwa 10 GeV), arbeitet. Ein Myon Energiespektrum, wie man es in Datensätzen mit kosmischem Trigger im hadronische Kalorimeter erhält, ist in Abbildung 5.10 zu sehen. Kosmische Teilchen erzeugen Signale, die eine ähnliche Pulsform besitzen, wie die elektromagnetischen Schauer der Teilchen aus Kollisionen, im Gegensatz zu Signalen stammend

aus Ladungsinjektionen oder Laser-Pulsen.



**Abb. 5.10:** Verteilung der Maxima des Gauss-Landau Fits an ADC-Signale kosmischer Myonen aus dem Lauf 54062.

Diese Simulation wurde an einem Datensatz kosmischer Teilchen des Runs 54062 durchgeführt, der aus ca. 10000 Ereignissen besteht. Die L1A Triggersignale des Runs vom 6.4.2008 wurden von den Kalorimetern<sup>2</sup> und dem L1Calo Trigger generiert. Pro Ereignis beobachtet man zwei bis fünf Trigger-Tower über einer Energieschwelle von 75 ADC-Einheiten (entspricht 8.54 GeV nach Abzug des Pedestals von 40 ADC-Einheiten). Die Schwelle wurde aufgrund von Kanälen mit starkem Rauschen oder falsch eingestelltem Pedestal gewählt, um ein möglichst großes Energiespektrum mit möglichst wenig falsch identifizierten Signalen durch Rauschen zu untersuchen. Das Coarse-Timing wurde seit der Datennahme im April für Datensätze kosmischer Teilchen verbessert. Allerdings wurden die verwendeten ADC-Signale auf solche eingeschränkt, deren Maximum zentriert liegt, so dass nur noch Fine-Timing-Korrekturen benötigt werden. Gutes Coarse-Timing wird später immer als Voraussetzung für sinnvolles Anpassen gefordert werden.

### Ergebnisse der Simulation

Mit den simulierten Signalen kann man sowohl die Genauigkeit abschätzen, mit der ein Anpassen der Gauss-Landau-Funktion die Maximums-Position des analogen Si-

<sup>2</sup>In Testruns wurde den Kalorimetern gestattet eigenständig L1As zu generieren, ohne Umweg über den CTP.

gnals wiedergibt, als auch den Fehler der Energiemessung abschätzen. Die Annahme, die gemacht wurde ist die, dass die Gauss-Landau-Funktion die Signalform der Kalorimeter beschreibt. In der Art, wie der Digitalisierungsprozeß simuliert wurde kann man diese Studie als eine rauschfreie Studie für die maximale Leistungsfähigkeit der Methode auffassen. A priori ist nicht klar, ob angepasste Funktionen, die aus den ADC-Signalen entstehen, die Signalstruktur wiedergeben. Die Ergebnisse der Anpassung der Signale der kosmischen Teilchen, also die simulierten analogen Signale, müssen auf Konsistenz in sich und auf die Annahmen untersucht werden.

Der Fit an kosmischen ADC-Signale sollte gleichmäßig auf die vorliegenden Pulsformen reagieren. Das heißt man erwartet ein sinnvolles Energiespektrum (siehe Abb.: 5.10) und etwa normalverteilte Breiten der Signale. Das Spektrum der Breiten  $\sigma_{Gauss}$  und  $\sigma_{Landau}$  ist in Abbildung 5.11 links bzw. rechts abgebildet.

Sowohl für  $\sigma_{Gauss}$ , als auch für  $\sigma_{landau}$  entstehen Verteilungen, die sich näherungsweise durch eine Gauss-Funktion beschreiben lassen. Es deutet darauf hin, dass die beiden Variablen normalverteilt sind und die Antwort der Anpass-Funktion auf die ADC-Signale, die wir nur geringfügig<sup>3</sup> in Höhe und Position limitiert hatten, gleichmäßig ist. Zudem ist die Verteilung beider Breiten der Gauss-Landau-Funktion schlank. Die Breite von ca. 0.1 BC entspricht etwa 2.5 Nanosekunden.

Als nächstes fordert man, dass die erneut angepassten Gauss-Landau-Funktionen nicht stark von der Gauss-Landau-Funktion abweichen, die man zur Simulation der Digitalisierung verwendet hatte. Von den erneut angepassten Gauss-Landau-Funktionen fordert man:

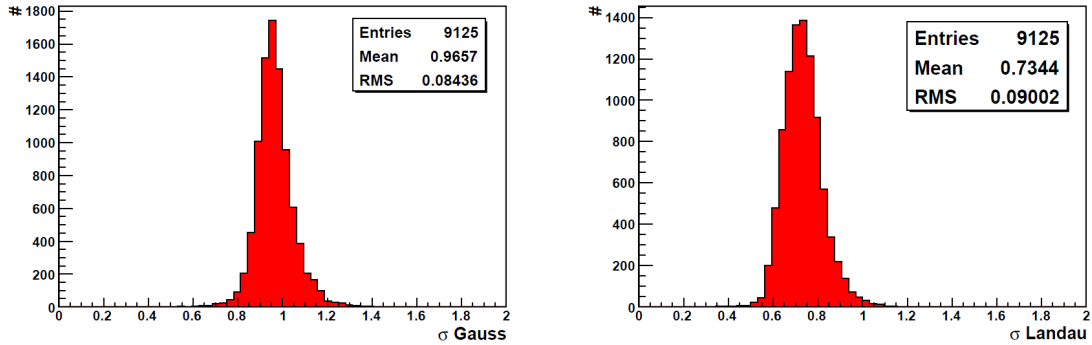
- Das Maximum der Fits der simulierten 25 Digitalisierungsschritte sollte konstant sein, und somit die gemessene Energie.
- Die Breiten  $\sigma_{Gauss}$  und  $\sigma_{Landau}$  sollten nicht stark variieren.
- Die Position des Maximums des Fits muss sich um etwa eine Nanosekunde zwischen den Schritten der Simulation verschieben.

Der letzte Punkt ist insbesondere für die Feinsynchronisation wichtig, bei der die Kenntnis des analogen Maximums entscheidend ist.

Es entsteht eine Ungenauigkeit in der Energiemessung, wenn das analoge Maximum in der Digitalisierung verfehlt wird. Die maximale Abweichung entsteht, falls die Digitalisierung um 12.5 Nanosekunden vom analogen Maximum abweicht und somit exakt zwischen zwei Punkten der Digitalisierung stattfindet. Um den Fehler der

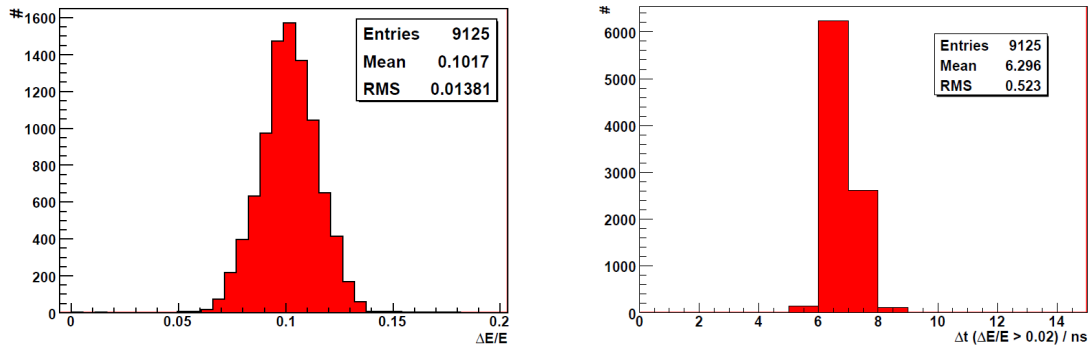
---

<sup>3</sup>Geringfügig deswegen, weil die Einschränkung auf gutes Coarse-Timing (Maximum Position = mittleres BC) keine ist. Es ist sinnvoll anzunehmen, dass gutes Coarse-Timing festgelegt sein wird, bevor man auf Ordnung von Nanosekunden berichtigt.



**Abb. 5.11:** (Links):  $\sigma_{Gauss}$  Werte aus 4-Parameter-Fit an Tile-ADC-Signale des Cosmic Runs 54062, (rechts):  $\sigma_{landau}$  Verteilung.

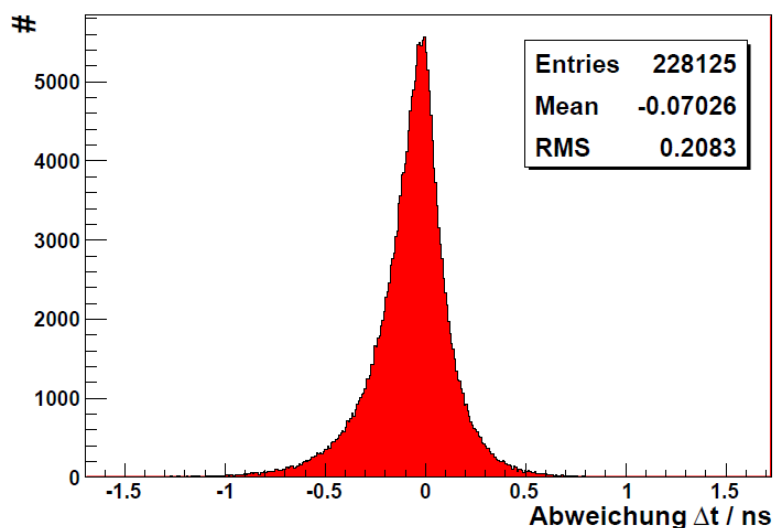
Energiemessung durch falsches Fine-Timing abzuschätzen, werden die ADC-Maxima der 25 simulierten Datensätze verglichen.



**Abb. 5.12:** (Links): Der simulierte maximale relative Fehler der Energiemessung des Level-1 Kalorimeter-Triggers im Tile-Kalorimeter, durch Abweichung der Digitalisierung vom analogen Maximum. (rechts): zeitlicher Abstand zum Maximum in Nanosekunden, bis  $\frac{\Delta E}{E} \geq 2\%$

Für jedes Signal wird die Differenz aus dem jeweiligen ADC-Maximum und dem absoluten ADC-Maximum aller 25 gebildet und durch das absolute Maximum geteilt, um den maximalen relativen Fehler abzuschätzen. Dabei entsteht pro simuliertem Signal ein Diagramm, wie es bereits in Abbildung 5.3 gezeigt wurde, an dem das Maximum abgelesen wird. Das Ergebnis des Datensatzes kosmischer Ereignisse sehen wir in Abbildung 5.12 links dargestellt. Der maximale relative Fehler beträgt  $\Delta E \approx 8 \pm 2\%$ . Rechts sieht man den Abstand zum Maximum in Nanosekunden, ab dem die Spezifikation von  $\Delta E \leq 2\%$  überschritten wird. Es ist also notwendig das Fine-Timing auf unter  $\pm 6$  ns genau ermitteln zu können. Diese Ergebnisse gelten für Signale des Tile-Kalorimeters. Dieselben Studien für das LAr-Kalorimeter sind am

Ende des Abschnittes zusammengefasst.



**Abb. 5.13:** Abweichung der Position des Maximums des 4-Parameter-Fits an die Simulierten ADC-Signale gegenüber der Erwartung für Tile-Kalorimeter Daten

Es soll nun untersucht werden, wie die Position des Maximums sich mit den 25 Datensätzen verändert. Bei der Erzeugung der Datensätze wurde in jedem Schritt der Punkt der Digitalisierung um einzelne Nanosekunden verschoben. Daher sollte in einem Fit dieser 25 Datensätze die Maximums Position sich ebenfalls um eine Nanosekunde verschieben. Lässt es sich zeigen, dass die Gauss-Landau-Funktion mit ausreichender Präzision dem analogen Maximum folgt, so hätte man die prinzipielle Synchronisierbarkeit des Pre-Prozessors durch die Fit-Methode gezeigt.

Es wird nun die Gauss-Landau-Funktion, die das analoge Signal simuliert, mit den Anpass-Funktionen der 25 Datensätze, die die Digitalisierung simulieren, verglichen. Für jeden der 25 Schritte wird die Differenz der Maximums Position des analogen Signals mit der der erneut gefitteten Funktion gebildet. Da in jedem Schritt die Digitalisierung eine Nanosekunde später einsetzt, wandern die Maxima der erneut gefitteten Signale nach links, während das analoge Maximum fest bleibt. Die Differenz wächst also theoretisch um eine Nanosekunde pro Schritt. Um die absolute Abweichung von der erwarteten Position für alle Schritte im selben Diagramm erfassen zu können, wird die Zahl der Nanosekunden subtrahiert, um die die Digitalisierung versetzt wurde.

Das Ergebnis dieser Untersuchung ist in Abbildung 5.13 für simulierte Digitalisierung des Hadronischen Kalorimeters zusammengefasst. Die Maximums-Position des Fits weicht im Mittel um  $-0.07$  ns für jeden Schritt ab. Gleichzeitig liegt eine mittlere

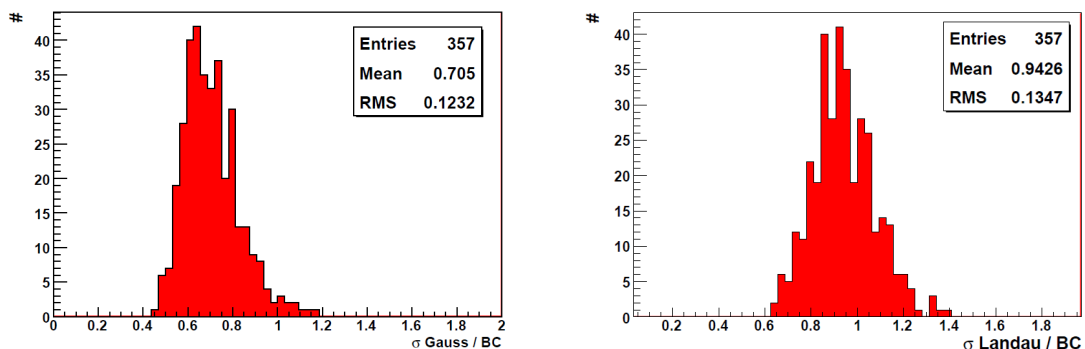


Streuung (RMS) um den Mittelwert von 0.2 ns vor. Diese beiden Werte bestimmen die simulierte absolute Abweichung von der Erwartung. Die Tendenz zu negativen Abweichungen entspricht der Vorstellung, dass das steilere Ende weniger gut durch die Digitalisierung beschrieben wird und hier stärkere Schwankungen der Ergebnisse des Fits zu erwarten sind. Auch wenn die Fluktuation des Fits um die erwartete Position keiner Gauss-Verteilung unterliegt, ist diese Genauigkeit dennoch ausreichend für unsere Zwecke, denn wir hatten oben  $\Delta t < 6$  ns als Ziel bestimmt.

Dennoch wird ein Anpassen an echte ADC-Signale ungenauer sein, da hier eine rauschfreie Simulation studiert wurde. Die Unkenntnis der eigentlichen Position des analogen Maximums und Abweichungen des Fits bei anwesendem Rauschen unter Verwendung echter ADC-Signale werden später einen systematischen Fehler liefern, der über den hier als unter einer halben Nanosekunde ermittelten Fehler der Zeitmessung hinausgeht.

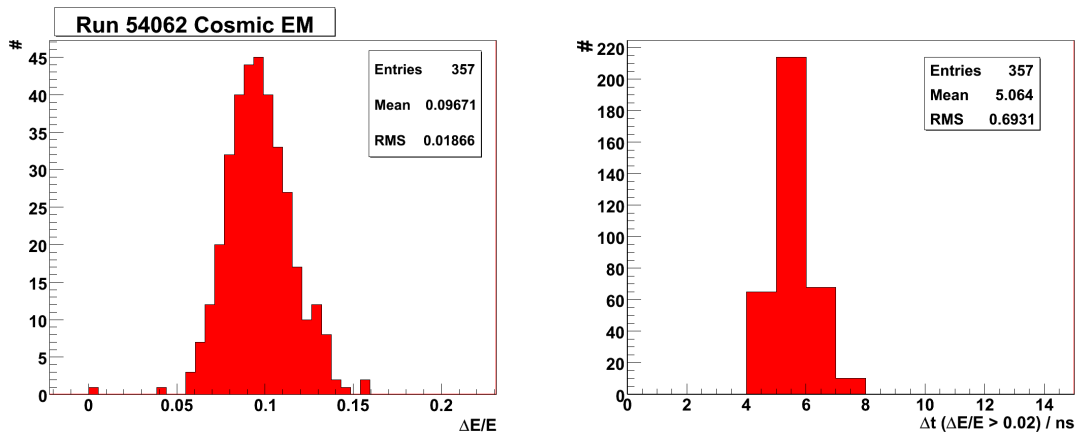
### Ergebnisse für Liquid Argon Kalorimeter Signale

Im Folgenden werden die Resultate der Analysen des vorherigen Paragraphen an LAr-Signalen aufgeführt. Im allgemeinen fallen die Ergebnisse schlechter aus, als für die Tile-Kalorimeter-Signale. Zum einen ist die Gauss-Landau-Funktion schlechter geeignet den Puls der LAr-Signale anzupassen, da die Pulsform, die die Ionisation des Argons hinterlässt, eine andere ist, als die der Photomultiplier im Tile-Kalorimeter. Desweiteren werden im LAr-Kalorimeter im zentralen Bereich bis zu 60 Zellen zu einem Trigger-Tower summiert, während im Tile-Kalorimeter nur 5 Zellen aufeinander abgestimmt werden müssen. Hinzu kommt, dass in Datensätzen, in denen auf kosmische Teilchen getriggert wird, deutlich weniger Teilchen das EM-Kalorimeter durchqueren, als das umhüllende Tile-Kalorimeter. Dennoch werden die Methoden auf das LAr-Kalorimeter übertragen.



**Abb. 5.14:** (Links):  $\sigma_{Gauss}$  Werte aus 4 Parameter Fits an kosmische LAr ADC-Signale des Cosmic Runs 54062, (rechts):  $\sigma_{landau}$  Verteilung

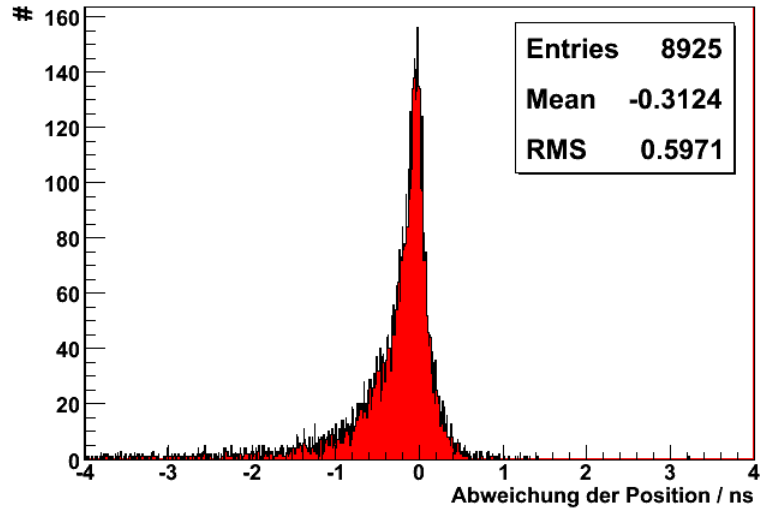
Die Verteilungen von  $\sigma_{Gauss}$  und  $\sigma_{Landau}$  des LAr-Kalorimeters in Abbildung 5.14 weisen Unterschiede zu denen des Tile-Kalorimeters auf.  $\sigma_{Landau}$  weist mit 0.94 BC einen größeren Mittelwert auf als  $\sigma_{Gauss}$  mit 0.7 BC. In derselben Studie für das Tile-Kalorimeter waren die Größenverhältnisse umgekehrt. Außerdem treten im Fit mit 0.12 BC und 0.13 BC für beide Größen fast doppelt so große Schwankungen um den Mittelwert auf, wie für das Tile. Die Daten bedeuten, dass der Fit an LAr-Kalorimeter-Signale die ansteigende Flanke als steiler erkennt, als im Tile, während gleichzeitig die abfallende Flanke länger erscheint.



**Abb. 5.15:** (Links): Simulierter relativer Fehler der Energiemessung in LAr Signalen, (rechts): zeitlicher Abstand vom Maximum in Nanosekunden, bis  $\frac{\Delta E}{E} \geq 2\%$

Abbildung 5.15 zeigt links den simulierten maximalen relativen Fehler der Energiemessung durch schlechtes Fine-Timing im LAr-Kalorimeter. Der Fehler ist mit ca. 10 % im Mittel etwa genauso groß, wie der Fehler der Tile-Kalorimetersignale. Das oben als steiler festgestellte ansteigende Ende der Signale macht sich hier nicht bemerkbar. Dagegen zeigt Abbildung 5.15 rechts, dass der Fehler im Mittel schon bei etwa 5 ns Abstand zum Maximum die 2 % Hürde des relativen Fehlers übersteigt. Da generell die Gauss-Funktion schneller abfällt als die Landau-Kurve wird der Fehler durch die Gauss Kurve bestimmt. Dies gilt allerdings auch für die Tile-Pulse.

Die Simulation der Abweichung des Maximums des Fits von der eigentlichen Position des analogen Maximums zeigt ebenfalls, die unpassendere Beschreibung der LAr Signale durch die Gauss-Landau-Funktion. Im Mittel ergibt sich mit -0.31 ns eine fast 6 Mal größere Abweichung von der idealen Position als in der Tile Studie. Ebenfalls größer ist die Schwankung, die mit 0.6 ns dreimal so groß ausfällt, wie im Tile-Kalorimeter. Dennoch liegen diese Ergebnisse deutlich innerhalb der simulierten 5 ns als zu akzeptierenden Abstand zum Maximum und motivieren weitere Studien ebenfalls für das Tile- und das LAr-Kalorimeter durchzuführen. Abschließend sind



**Abb. 5.16:** Abweichung der Maximums Position des Fits von der Erwartung für LAr-Kalorimeterdaten.

die Ergebnisse der Simulationen für Tile und LAr in Tabelle 5.3 gegenübergestellt.

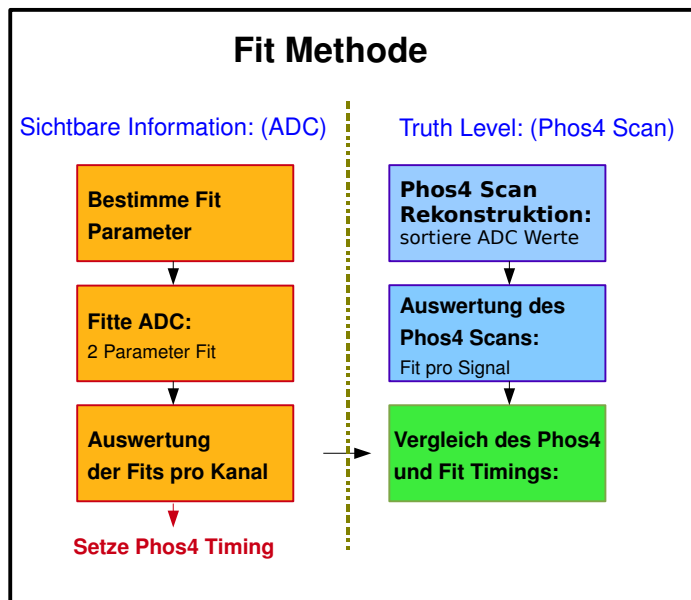
	Tile-Kalorimeter	LAr-Kalorimeter
$\sigma_{Gauss}$	$0.97 \pm 0.08$ BC	$0.71 \pm 0.12$ BC
$\sigma_{Landau}$	$0.73 \pm 0.09$ BC	$0.94 \pm 0.13$ BC
maximaler relativer Energiefehler durch schlechtes Fine-Timing	$10.1 \pm 1.4$ %	$9.7 \pm 1.9$ %
Toleranzabstand Digitalisierung zum analoges Maximum, s.d. $\Delta t(\frac{\Delta E}{E} \geq 2\%)$	$6.3 \pm 0.5$ ns	$5.1 \pm 0.7$ ns
simulierte Abweichung des Fits von der Position des analogen Maximums.	$-0.07 \pm 0.20$ ns	$-0.31 \pm 0.6$ ns

**Tab. 5.1:** Zusammenfassung der Ergebnisse der Simulationen mit Gauss-Landau-Funktionen zum Fine-Timing für das Tile- und das LAr-Kalorimeter.

## 5.4 Validierung der Fit-Methode

### Schema der Fit-Methode

Dieser Abschnitt gibt eine Übersicht über die wichtigsten Schritte der Fit-Methode in der Anwendung. Ein Blockdiagramm der Fit-Methode im Vergleich mit dem Phos4-Scan zeigt Abbildung 5.17. Das Schema ist in zwei Hälften geteilt. Die linke Hälfte gibt die Arbeitsschritte der Fit-Methode an. Die ermittelten Korrekturen können entweder mit den Ergebnissen des Phos4-Scans verglichen werden, oder an die Datenbanken des Systems weitergegeben werden, zur eigentlichen Korrektur des Timings.



**Abb. 5.17:** Zweigeteiltes Schema der Fit-Methode. Links: die Fit-Methode, wie sie auch für Kollisions-Daten angewendet werden könnte. Die Fixierung des Pedestals,  $\sigma_G$  und  $\sigma_L$  für einen zwei-Parameter-Fit, gefolgt von der Auswertung der Ergebnisse. Rechts: Im Falle eines Phos4-Scans ist die Überprüfung der Fit-Methode durch Rekonstruktion der Phos4-Signale möglich. Mit einem 5-Parameter-Fit wird die Referenzkorrektur bestimmt.

Der erste Punkt „Bestimmung der Fit Parameter“, legt insbesondere  $\sigma_{Gauss}$  und  $\sigma_{Landau}$  auf bestimmte Werte fest. Wie genau dies geschehen soll, ist hier noch nicht klar, aber es besteht die Möglichkeit, Werte aus Erfahrung festzulegen. Zudem wäre es möglich dies für jeden Trigger-Tower individuell zu tun. Wenn nicht anders angegeben, werden im Folgenden alle betrachteten Trigger-Tower gleichbehandelt. Der

nächste Schritt stellt den eigentlichen Fit-Prozess dar. In einem zwei-Parameter-Fit wird eine Gauss-Landau-Funktion, deren Pedestal und die Breiten  $\sigma_G$  und  $\sigma_L$  fixiert sind, an die ADC-Signale der Trigger-Tower angepasst, um die Amplitude und die Position des Maximums zu bestimmen. Im Gegensatz zu der vorhergehenden Simulationsstudie wird die Zahl der Parameter für die Fit-Methode angewendet auf wirkliche Daten reduziert, da die Fit-Methode mit 4 freien Parametern zu ungenaue Ergebnisse zeigt. Da das Anpassen zeitlich den größten Teil der Auswertung einnimmt, wird das Fitten der ADC-Signale getrennt ausgeführt und die Ergebnisse für spätere Analysen gespeichert. Der letzte Block beinhaltet die Auswertung der Ergebnisse, d.h. das Mitteln von Fit-Ergebnissen pro Tower und das Berechnen der Zeitkorrektur. Außerdem können die Fit-Resultate in einem Format ausgegeben werden, die leichte Aufnahme in die Datenbanken des Kalorimeter-Triggersystems erlauben.

Die rechte Seite beschreibt die Datenauswertung im Falle eines Phos4-Scans. Da diese Seite im Falle von Kollisionen nicht verfügbar ist, ist sie mit dem in Simulationen oft verwendeten Begriff „Truth Level“ bezeichnet. Zunächst werden die Signale wie in 4.3 rekonstruiert. Im nächsten Schritt werden die Phos4-Signale ebenfalls mit einer Gauss-Landau-Funktion angepasst, allerdings mit einem 5-Parameter-Fit, bei dem das Pedestal als freier Parameter betrachtet wird. An den so entstandenen Gauss-Landau-Funktionen liest man das Maximum ab und bestimmt daraus den entsprechenden Phos4-Schritt. Anschließend werden die Vorhersagen beider Methoden in der grünen Box verglichen.

### Datenauswahl für die Fit-Methode

Um die Resultate der Fit-Methode zu überprüfen, werden diese mit den Ergebnissen eines Phos4-Scans verglichen. Im Folgenden werden vornehmlich Daten aus Phos4-Scans (Abschnitte 4.2, 4.3) betrachtet. Dabei gilt es in der Implementierung der Vergleichsalgorithmen zu beachten, dass die beiden Methoden (Phos4 und Fit) getrennt ausgewertet und nur Schnitte auf Variablen gelegt werden, die immer zur Verfügung stehen.

Auf Seiten der Anpass-Methode werden solche ADC-Signale verwendet, deren ADC-Maximum sich in einem der mittleren drei BC befindet und deren Maximum einen wählbaren Schwellenwert überschreitet. Es wird kein Schnitt auf die Breiten der Gauss-Landau Kurve gelegt, da die Breiten in den Fits der 5 ADC-Werte später fixiert werden, um die Anzahl der freien Parameter zu reduzieren. Der Schnitt auf Ereignisse, die ihr Maximum zentriert haben, ist notwendig, da der Fit in diesen Fällen das Maximum nicht sinnvoll wiedergeben kann. Ein typischer Schwellenwert ist 60 ADC-Einheiten, der je nach Qualität der Daten, abhängig von Rauschen oder falsch

eingestelltem Pedestal, verändert werden muss. Die Auswahl der Trigger-Tower, die diese Bedingungen erfüllen, bilden den Teil der Daten, die verwendet werden, um aus ihnen mit der Fit-Methode Timing-Korrekturen zu bestimmen.

Auf Seiten der Auswertung der rekonstruierten Phos4-Signale lassen sich strengere Einschränkungen machen. Da in die Ergebnisse des Phos4-Scans die Information von 125 Datenpunkten einfließen, um ein Signal zu rekonstruieren, definieren diese Resultate das zugrunde liegende ideale Timing. Zeigt ein rekonstruiertes Phos4-Signal Anomalien durch Rauschen, verlorene Bits durch Probleme in der elektronischen Auslese<sup>4</sup>, das Maximum außerhalb des betrachteten Bereiches oder einen nicht korrekt initialisierten Phos4-Chip, so erwartet man für beide Methoden keine sinnvollen Ergebnisse. Nachfolgend sind die Schnitte auf extreme Werte in den Breiten, der Höhe und nicht zentrierten Maximums Positionen aufgelistet.

- $10 \text{ ns} < \sigma_{Gauss} < 40 \text{ ns}$
- $10 \text{ ns} < \sigma_{Landau} < 40 \text{ ns}$
- Max. ADC-Wert  $>$  Schwelle wie in Fit-Methode (z.B. 60 ADC-Einheiten)
- $30 \text{ ns} < \text{Maximum Position} < 120 \text{ ns}$

Es werden zur Fit-Methode vergleichbare Selektionkriterien angewendet. Die Werte in denen  $\sigma_{Gauss}$  und  $\sigma_{Landau}$  eingeschränkt sind, wurden so gewählt, dass sie die in den Abbildungen 5.11 und 5.14 ermittelten Werte der Breiten einschließen.

### Vergleich von Phos4-Scan und Fit

Die Ergebnisse aus Anpass-Methode und Phos4-Scan-Rekonstruktion werden verglichen, indem auf beide Arten pro Kanal eine Timing-Korrektur ermittelt wird. Die Fine-Timing-Korrektur und der Phos4-Schritt werden als eine ganze Zahl zwischen 0 und 24 berechnet, die der Zeitversetzung der Digitalisierung in Nanosekunden entspricht.

Aus einem Phos4-Scan ermittelt man für jeden durchlaufenen Phos4-Schritt<sup>5</sup> eine Korrektur. Es ist ausreichend, pro Phos4-Schritt etwa 20-30 Ereignisse für Fits zu verwenden und die Ergebnisse zu mitteln. Das Ergebnis jedes Schrittes wird mit

<sup>4</sup>Betrifft wenige Kanäle, mittlerweile repariert.

<sup>5</sup>Im Allgemeinen sind es 25 Schritte. Technische Probleme während des Phos4-Scans, die im Rahmen dieser Diplomarbeit aufgedeckt wurden [20], können die Datenübertragung stoppen und zu fehlenden Schritten führen. Das Problem wird umgangen, indem in der Praxis jeder Phos4-Schritt zweimal durchlaufen wird.

dem Ergebnis des Phos4-Scans verglichen, welches theoretisch für jeden der Schritte dasselbe sein sollte.

Das Mitteln unter periodischen Bedingungen birgt einige Probleme und ist im Allgemeinen nicht sinnvoll. Zum Beispiel ist das Mittel der Positionen zweier auf einem Kreis gegenüberliegender Punkte nicht wohldefiniert. Liegt aber eine Häufung von Datenpunkten auf einem Teil der Periode vor, so lässt sich etwas wie einen Mittelwert bestimmen, indem man die Position der Häufung bestimmt und die periodische Strecke so als normale Strecke aufgefasst wird, dass die Häufung nicht zweigeteilt wird. Da keine gleichmäßige Streuung der Fit-Ergebnisse eines Kanals über die Periode der 25 Phos4-Schritte oder Nanosekunden erwartet wird, werden die Ergebnisse hier gemittelt. Man addiert oder subtrahiert zu den Fit-Ergebnissen eines Kanals Vielfache von 25 ns und minimiert so die Standardabweichung des Mittelwertes. Der im Minimum der Standardabweichung entstehende Mittelwert  $x_{maxFIT}$  wird verwendet, um die Timing-Korrektur zu bestimmen.

Abbildung 5.18 oben zeigt insgesamt 25 ADC-Signale eines Trigger-Towers des Tile-Kalorimeters aus einem Phos4-Scan, die mit ansteigendem Phos4-Inkrement aufgenommen wurden. Zusätzlich ist in jedem Signal ein zwei-Parameter-Fit eingezeichnet. Von oben links nach unten rechts <sup>6</sup> erkennt man, wie das Maximum nach links wandert, bzw. der ADC-Wert links neben dem Maximum wächst. Die Fits an die ADC-Signale, deren Maximum nicht am Rand liegt, scheinen die Position recht gut wiederzugeben, da die angepasste Gauss-Landau Kurve langsam nach links wandert. Man erkennt, dass die Signale 13-17 um 1 BC verschoben sind, was im rekonstruierten Phos4-Signal korrigiert werden muss (siehe: Abschnitt 4.3). Abbildung 5.18 unten zeigt das zugehörige rekonstruierte Phos4-Signal des Tile-Kanals 07080702 (Notation siehe: 3.4) aus dem Phos4-Scan 96981 mit 5 Parameter Fit. Der Fit ist ein Beispiel, an dem man erkennt, dass die Gauss-Landau-Funktion über weite Bereiche des Pulses mit der Signalform übereinstimmt.

Die Korrektur für die rekonstruierten Phos4-Signale entsteht aus der Position des Maximums in Nanosekunden, die an einer angepassten Gauss-Landau-Funktion abgelesen wird. Das Maximum entspricht genau einer Einstellung des Phos4-Chips (siehe Abschnitt 4.3 ).

Es gilt denselben Wert aus den Positionen der Maxima, der mit zwei freien Parametern an die ADC-Signale angepassten Gauss-Landau-Funktionen, zu berechnen. Das Maximum eines ideal synchronisierten Kanals fällt auf das Zentrum  $x_0$  des ADC-Signals. Ermittelt man den Abstand der vorliegenden Maximums-Position zum Zentrum in Nanosekunden modulo 25 ns und berücksichtigt den eingestellten Wert, so lässt sich eine ideale Wahl des Phos4-Schrittes für jedes Signal bestimmen. Die

---

<sup>6</sup>Links oben wird als 0 gezählt, daneben 1, usw... bis 24.

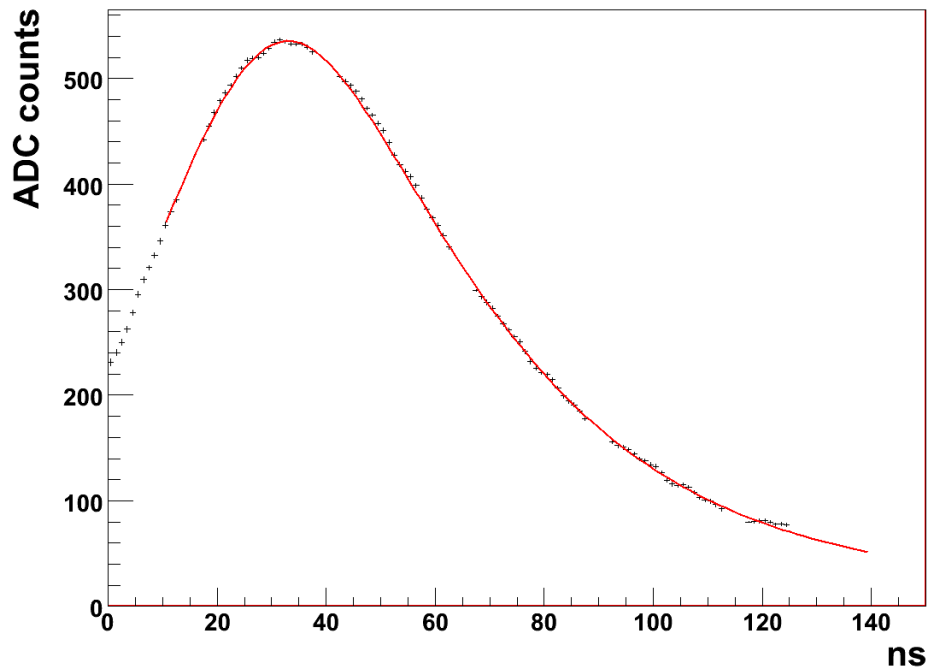
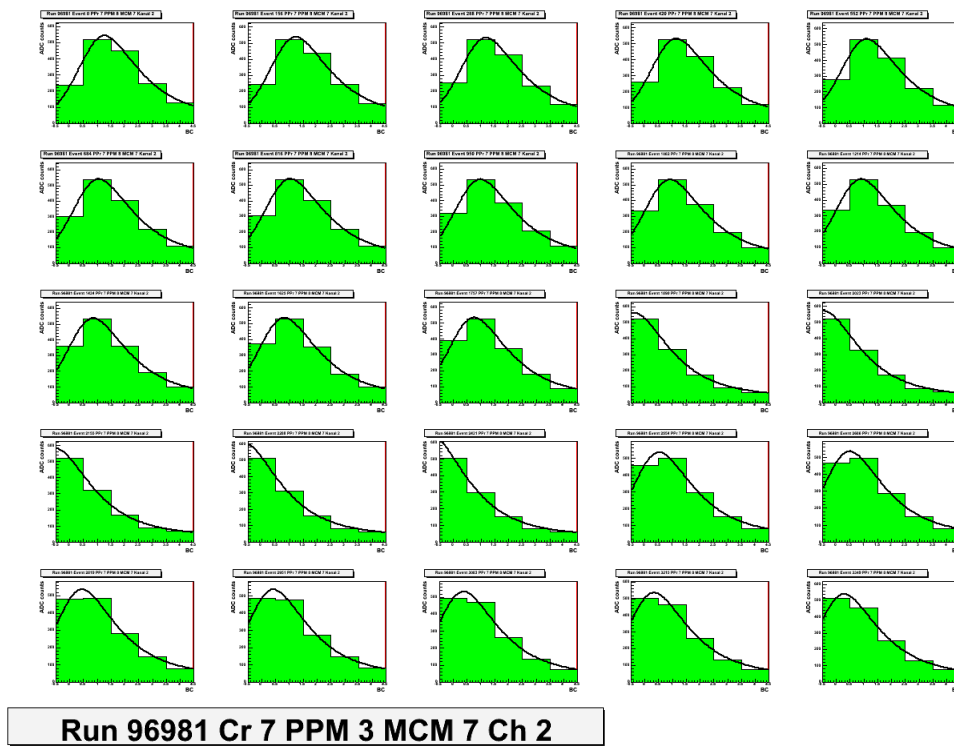


Abb. 5.18: (Oben): ADC-Signale des Tile Kanals 07030702 für alle Phos4-Schritte des Phos4-Scans 96981 (unten): rekonstruiertes Phos4-Signal desselben Kanals mit Gauss-Landau Fit.



Differenzbildung modulo 25 ns wird verwendet, da es bei Triggerentscheidungen zu Sprüngen um ein ganzes BC kommen kann.

Die folgenden Formeln 5.3 und 5.4 geben die Rechnung zu den Timing-Korrekturen aus Phos4-Scan  $\Delta_{phos4}$  und Fit  $\Delta_{fit}$  an.  $x_{maxP4}$  steht in 5.3 für die Position des Maximums des Phos4-Signals.  $x_{maxFIT}$  ist der Wert der Maximums-Positionen der zwei-Parameter-Fits an die 20-30 ADC-Signale, die oben erwähnt wurden.  $\Delta$  ist der verwendete Phos4-Schritt und die  $x_0$  steht für die Mitte des Histogramms, welches das Signal enthält. Bei idealem Fine-Timing fällt  $x_0$  mit dem Maximum  $x_{maxFIT}$  zusammen und die Timing-Korrektur stimmt mit dem verwendeten Phos4-Schritt  $\Delta$  überein.

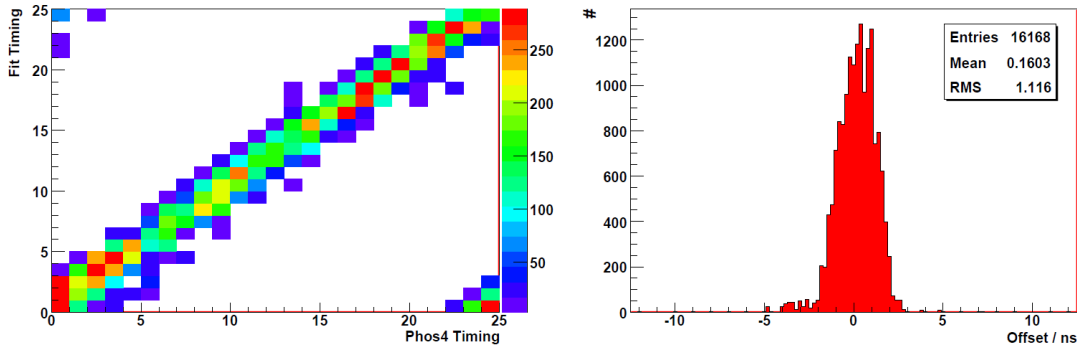
$$\Delta_{phos4} = \{x_{maxP4} / ns\} \text{ mod } 25 \quad (5.3)$$

$$\Delta_{fit} = \{\Delta - \{(x_0 - x_{maxFIT})/ns \text{ mod } 25\}\} \text{ mod } 25 \quad (5.4)$$

In Abbildung 5.19 (links) sind die Ergebnisse der Fit-Methode und der Auswertung des Phos4-Scans, in Form der berechneten idealen Phos4-Schritte, gegeneinander als  $(\Delta_{phos4}, \Delta_{fit})$  aufgetragen. Auf der X-Achse ist der Referenz-Wert des Phos4-Signals aufgetragen, der das ideale Timing definiert. Die Y-Achse entspricht dem Ergebnis der Fit-Methode. Für jeden im Phos4-Scan auftretenden Phos4-Schritt des Runs entsteht ein Resultat der Fit-Methode. Wenn ein rekonstruiertes Phos4-Signal des jeweils betrachteten Kanals vorhanden ist, wird für jedes Ergebnis der Fit-Methode ein Eintrag in dem Diagramm der Korrelation gemacht. Dies sind die Ergebnisse des Ladungsinjektions-Runs 101357 des Tile-Kalorimeter Long Barrels auf der A Seite vom 09.01.2009, der als Phos4-Scan durchgeführt wurde (siehe Abschnitt 4.2). Eine stark korrelierte Verteilung ist sichtbar, die mit einer gewissen Breite auf einer Geraden von etwa der Steigung 1 liegt. Das zeigt, dass in diesem Fall die Fit-Methode bis auf eine Ungenauigkeit, die durch die Breite der Korrelation gegeben ist, mit dem Phos4-Scan übereinstimmt und funktioniert.

An solchen Korrelationen lässt sich studieren, welche Signale von der Korrelationslinie abweichen, um mögliche Probleme zu identifizieren. Solche Analysen haben wir an verschiedenen Datensätzen durchgeführt und dabei verschiedene Typen problematischer Signalformen in den Phos4-Scans entdeckt, die aber nicht an dieser Stelle aufgeführt werden [18]. Will man diese Korrelationen genauer verstehen oder bereinigen, so muss man jedes rekonstruierte Phos4-Signal einzeln begutachten. Derzeit werden regelmäßig die rekonstruierten Signale der Phos4-Scans an andere Mitarbeiter der Kollaboration für weitere Studienzwecke übermittelt [19].

Es gibt zwei entscheidende Größen, die man dieser Korrelation entnehmen aber in anderer Form besser erkennen kann: Die Breite der Korrelation ist die Streuung



**Abb. 5.19: (Links):** Korrelation der Fine-Timing Korrekturen aus Fit und Phos4-Scan des Runs 101357 mit  $\sigma_G = 0.95$  BC und  $\sigma_L = 0.60$  BC, **(rechts):** Verteilung der Differenzen zwischen Fit (Y) und Phos4-Scan (X) der Korrelation

der Fit-Ergebnisse der Kanäle innerhalb der Korrelation für die verschiedenen auftretenden Phos4-Schritte und gibt die Genauigkeit der Fit-Methode an. Der mittlere Abstand der Ergebnisse der Fit-Methode zu den Resultaten des Phos4-Scans ergibt ein zu berichtendes Offset. Im Folgenden wird dieser Abstand als Achsenabschnitt oder auch als Offset bezeichnet. Das Offset beeinflusst nicht direkt die Genauigkeit der Fit-Vorhersage, da aber in der Fit-Methode die Breiten der Gauss-Landau-Funktion fixiert wurden, muss das Offset in der Vorhersage der Timing-Korrekturen berücksichtigt werden. Die Schwankung der Offsets der betrachteten Datensätze wird später einen systematischen Fehler der Fit-Methode ergeben, den man berücksichtigen muss, wenn man die Präzision, mit der man das Timing für beliebige Datensätze bestimmen kann, abschätzen will. Die Werte der Breite und des Achsenabschnittes erhält man, indem man die Differenzen aus Fit- und Phos4-Ergebnis des Timings pro Kanal bildet.

In Abbildung 5.19 (rechts) sind die Differenzen  $Y - X$  aufgetragen. Diese Verteilung ist durch  $\langle Y - X \rangle \pm \sqrt{\langle (Y - X)^2 \rangle} = 0.16 \pm 1.12$  ns beschrieben. Die Präzision, mit der sich das Fine-Timing bestimmen lässt, kann man auf  $\sigma = 1.12$  ns abschätzen, da die Einträge mit diesem Wert um die Korrelation schwanken. Dieses Ergebnis ist mit einer Ungenauigkeit durch die Breite von  $O(1$  ns) nahe der Vorhersage durch die Simulation im vorausgehenden Abschnitt 5.3.

Eine der Größen, die die Genauigkeit der Fein-Synchronisierung bestimmen, erscheint hier zum ersten Mal: der Achsenabschnitt der Korrelation. Er drückt aus, in welche Richtung die Position des Maximums im zwei-Parameter-Fit von der wirklichen Position des analogen Maximums abweicht. Der Achsenabschnitt gibt die systematische Abweichung der Fit-Methode zum Phos4-Scan an. Wäre die Abweichung für alle Signale und Läufe konstant, so ließe sich in der Vorhersage des Timings auf diese korrigieren. Es zeigt sich aber, dass der Achsenabschnitt zwischen den Läufen

variiert. Diese Streuung wirkt sich auf die Fit-Methode als ein systematischer Fehler aus.

Es wurde im Laufe der Einführung der Anpass-Methode darauf hingewiesen, dass es problematisch ist, 5 Datenpunkte mit 4 Parametern anzupassen. Führt man dieselben Studien mit 4 freien Parametern durch, ergeben sich Breiten der Korrelation, die zeigen, dass die Methode mit 4-Parameter-Fits zu unpräzise ist. Daher ist es notwendig die Zahl der freien Parameter der Gauss-Landau-Funktion zu reduzieren. In den Fits der ADC-Signale der oben gezweigten Korrelation ist die Zahl der freien Parameter auf zwei reduziert. Die Breiten der Gauss-Landau-Funktion werden auf Werte fixiert ( $\sigma_{Gauss} = 0.95 \text{ BC} = 23.75 \text{ ns}$ ,  $\sigma_{Landau} = 0.60 \text{ BC} = 15 \text{ ns}$ ), die sich als typisch ergeben und den Breiten der rekonstruierten Phos4-Signale entsprechen. Zu diesen fixierten Breiten gilt es das Offset der Korrelationsverteilungen zu bestimmen, um auch die systematischen Ungenauigkeiten der Fit-Methode zu verstehen.

### Abschätzung des Fehlers der Fit-Methode

Als Ungenauigkeit für unsere Fine-Timing Korrekturen ergibt sich die Breite der Korrelation als statistischer Fehler und die Schwankung des Achsenabschnitts als systematischer Fehler. Die Tabellen 5.2 und 5.3 geben eine Zusammenstellung der ausgewerteten Datensätze für das Tile- und LAr-Kalorimeter. Die Datenanalyse wurde pro Datensatz aufgeteilt in die verschiedenen gepulsten Regionen. Ein Crate entspricht 1024 Kanälen.

Run #	Beschreibung	$\sigma_G$ [BC]	$\sigma_L$ [BC]	Offset [ns]	RMS [ns]	$\overline{Max}$
84564	Cr. 6	0.95	0.60	0.23	0.92	314
	Cr. 6	0.90	0.60	-0.64	0.90	
84572	Cr. 7	0.95	0.60	0.52	0.87	322
	Cr. 7	0.90	0.60	-0.28	0.91	
84585	Cr. 6	0.95	0.60	1.38	1.12	283
	Cr. 6	0.90	0.60	0.34	1.11	
86303	Cr. 7	0.95	0.60	0.19	0.81	163
	Cr. 7	0.90	0.60	-0.72	0.78	
86305	Cr. 7	0.95	0.60	0.48	0.83	122
	Cr. 7	0.90	0.60	-0.43	0.79	
86309	Cr. 7	0.95	0.60	1.45	0.89	78
	Cr. 7	0.90	0.60	0.51	0.83	
86316	Cr. 6	0.95	0.60	0.13	0.77	161
	Cr. 6	0.90	0.60	-0.72	0.76	
86319	Cr. 6	0.95	0.60	0.64	0.88	121
	Cr. 6	0.90	0.60	-0.23	0.86	
86321	Cr. 6	0.95	0.60	1.93	1.03	78

Run #	Beschreibung	$\sigma_G$ [BC]	$\sigma_L$ [BC]	Offset [ns]	RMS [ns]	$\overline{Max}$
	Cr. 6	0.90	0.60	1.03	1.01	
93290	Cr. 6	0.95	0.60	0.36	0.86	84
	Cr. 6	0.90	0.60	-0.54	0.83	
94424	Cr. 6	0.95	0.60	0.29	1.08	215
	Cr. 7	0.95	0.60	0.25	1.21	
	Cr. 6	0.90	0.60	-0.61	1.07	
	Cr. 7	0.90	0.60	-0.64	1.19	
96981	Cr. 6	0.95	0.60	0.17	1.20	487
	Cr. 7	0.95	0.60	-0.29	0.94	
	Cr. 6	0.90	0.60	-0.71	1.18	
	Cr. 7	0.90	0.60	-1.13	0.92	
98466	Cr. 6	0.95	0.60	0.23	1.36	329
	Cr. 7	0.95	0.60	0.27	1.04	
	Cr. 6	0.90	0.60	-0.61	1.37	
	Cr. 7	0.90	0.60	-0.62	1.02	
101357	Cr. 6	0.95	0.60	0.16	1.12	333
	Cr. 7	0.95	0.60	0.17	1.24	
	Cr. 6	0.90	0.60	-0.72	1.12	
	Cr. 7	0.90	0.60	-0.72	1.24	
$\Sigma$	Cr. 6	0.95	0.60	$0.55 \pm 0.58$	$1.03 \pm 0.17$	
	Cr. 6	0.90	0.60	$-0.34 \pm 0.55$	$1.02 \pm 0.18$	
$\Sigma$	Cr. 7	0.95	0.60	$0.38 \pm 0.47$	$0.98 \pm 0.16$	
	Cr. 7	0.90	0.60	$-0.50 \pm 0.45$	$0.96 \pm 0.16$	
$\Sigma$	Cr. 6+7	0.95	0.60	$0.48 \pm 0.54$	$1.01 \pm 0.17$	
	Cr. 6+7	0.90	0.60	$-0.41 \pm 0.51$	$0.99 \pm 0.17$	

Tab. 5.2: Liste betrachteter Phos4-Scans im Tile-Kalorimeter und deren Parameter. Von links nach rechts die Spalten: Run-Nummer, kurze Beschreibung, fixiertes  $\sigma_{Gauss}$ , fixiertes  $\sigma_{Landau}$ , Y-Achsenabschnitt der Korrelation, dessen RMS, mittlere Höhe des Maximums in ADC-Einheiten. Die Datenqualität ist hier nicht erfasst und kann variieren, z.B. fehlende Phos4-Schritte oder springendes Timing.

Die Datensätze der Phos4-Scans mit Pulser-Signalen im Tile-Kalorimeter sind in Tabelle 5.2 aufgelistet. Die fixierten Werte der Breiten des zwei-Parameter-Fits sind so gewählt, dass möglichst die Breite und der Betrag des Achsenabschnitts minimiert werden. Die verwendeten Werte von  $(\sigma_G, \sigma_L)$  sind (0.95 BC, 0.60 BC) und (0.90 BC, 0.60 BC). Die Breiten der Korrelationsanalysen liegen für alle Runs unter 2 ns. Die Läufe 86303 und 86316 und jeweils die zwei nachfolgend angegebenen Runs sind Beispiele von Phos4-Scans, in denen die Pulshöhe variiert wurde. Diese wurden

jeweils am selben Tag aufgezeichnet und besitzen vergleichbare Datenqualität. Es ist eine kleine systematische Verschiebung des Offsets von einer Nanosekunde für diese Läufe zu erkennen. Je größer die Amplitude, desto größer ist das Offset. Dies sollte als mögliche Fehlerquelle durch unterschiedliches Verhalten der Fits an Signale aus Kollisionen betrachtet werden. Außerdem nimmt die Breite der Offset-Verteilung für Runs mit niedrigen Pulsen zu, was der Erwartung entspricht, dass hohe Pulse einfacher zu identifizieren sind und weniger von Rauschen beeinflusst werden. Die geringen Schwankungen der Fit-Ergebnisse ließen es zu, das Timing mit einer Präzision von unter  $\pm 6$  ns festzulegen. Die Präzision der Ergebnisse der Korrelationsstudien für das gesamte Tile-Kalorimeter ist in Formel 5.5 für Crate 6 und 7 mit  $(\sigma_G, \sigma_L) = (0.95 \text{ BC}, 0.60 \text{ BC})$  zusammengefasst, die Werte sind pro Crate in den letzten Zeilen von Tabelle 5.2 angegeben.

$$\Delta t_{FitTile} = 0.48 \text{ ns} \pm 1.01 \text{ ns}_{Stat} \pm 0.54 \text{ ns}_{Sys} \quad (5.5)$$

Die Abweichung der ermittelten Phos4 Korrekturen durch den Fit, im Vergleich zur Auswertung des Phos4-Scans ist gegeben durch  $\Delta t_{FitTile}$ . Der Mittelwert der Achsenabschnitte oder der Offsets ergibt sich zu 0.48 ns, ist also fast zu vernachlässigen. Der statistische Fehler ist der Mittelwert der Breiten in Tabelle 5.2. Der systematische Fehler ist gegeben durch die Standardabweichung der Achsenabschnitte vom Mittelwert. Dieses Ergebnis gilt für die Breiten  $\sigma_G=0.95 \text{ BC}$  und  $\sigma_L=0.60 \text{ BC}$ . Damit die Präzision optimiert wird, können die Crates in der Analyse individuell behandelt werden. Allerdings scheint die Abweichung, die durch Gleichbehandlung entsteht, unter einer Nanosekunde zu liegen, sodass dies unter den gegebenen Anforderungen für den Fall des Tile-Kalorimeters nicht zwingend notwendig ist.

Run #	Beschreibung	$\sigma_G$ [BC]	$\sigma_L$ [BC]	Offset [ns]	RMS [ns]	$\overline{Max}$
68795	Cr. 2	0.90	1.10	-1.06	1.85	257
	Cr. 3	0.90	1.10	-1.11	2.26	247
93439	Cr. 0	0.90	1.1	-5.27	2.80	227
	Cr. 2	0.90	1.1	-3.08	1.65	335
	Cr. 4 had	0.95	0.60	1.63	2.07	184
	Cr. 4 had	0.90	0.60	0.72	2.02	
94307	Cr. 0	0.90	1.10	-5.51	2.71	603
	Cr. 2	0.90	1.10	-2.88	1.54	461
	Cr. 4 had	0.95	0.60	3.46	0.88	319
	Cr. 4 had	0.90	0.60	2.51	0.88	
94309	Cr. 0	0.90	1.10	-5.38	2.61	323
	Cr. 2	0.90	1.10	-2.83	1.51	427
	Cr. 4 had	0.95	0.60	3.41	1.06	218
	Cr. 4 had	0.90	0.60	2.47	1.05	

Run #	Beschreibung	$\sigma_G$ [BC]	$\sigma_L$ [BC]	Offset [ns]	RMS [ns]	$\overline{Max}$
97161	Cr. 0	0.9	1.1	-4.58	2.95	604
	Cr. 1	0.9	1.1	-4.92	2.83	613
	Cr. 2	0.9	1.1	-1.98	1.69	400
	Cr. 3	0.9	1.1	-2.59	2.06	392
	Cr. 4 had	0.95	0.60	3.96	0.95	198
	Cr. 5 had	0.95	0.60	5.54	1.43	201
	Cr. 4 had	0.90	0.60	3.01	0.94	
	Cr. 5 had	0.90	0.60	4.54	1.35	
$\Sigma$	Cr. 0	0.90	1.10	$-5.18 \pm 0.36$	$2.76 \pm 0.12$	
$\Sigma$	Cr. 1	0.90	1.10	-4.92	2.83	
$\Sigma$	Cr. 0+1	0.90	1.10	$-5.13 \pm 0.34$	$2.78 \pm 0.11$	
$\Sigma$	Cr. 2	0.90	1.10	$-2.37 \pm 0.75$	$1.65 \pm 0.12$	
$\Sigma$	Cr. 3	0.90	1.10	$-1.85 \pm 0.74$	$2.16 \pm 0.10$	
$\Sigma$	Cr. 2+3	0.90	1.10	$-2.22 \pm 0.79$	$1.79 \pm 0.26$	
$\Sigma$	Cr. 4 had	0.95	0.60	$2.18 \pm 0.87$	$1.22 \pm 0.46$	
$\Sigma$	Cr. 5 had	0.90	0.60	4.54	1.35	

Tab. 5.3: Liste betrachteter Phos4-Scans im LAr-Kalorimeter. Variablen wie in Tabelle 5.2. Für Crate 4 und 5 wird hadronisch und EM unterschieden.

Tabelle 5.3 fasst die Ergebnisse der betrachteten Phos4-Scans mit Pulsen im LAr-Kalorimeter zusammen <sup>7</sup>. Die Breite  $\sigma_G$  wurde fixiert auf den Wert von  $0.8 \text{ BC} = 20 \text{ ns}$ ,  $\sigma_L$  liegt bei  $1.1 \text{ BC} = 27.5 \text{ ns}$ . Die Ergebnisse des LAr-Kalorimeters unterscheiden sich zu denen des Tile-Kalorimeters durch größere Breiten der Korrelationen, deren Offset sich zwischen den Crates stark unterscheidet.

Die Breiten der Korrelation, die sich für Crate 2 und 3, ergeben, liegen alle unter  $2 \text{ ns}$ . Allerdings besitzen die große Teile der Endkappenbereiche  $1.6 < |\eta| < 3$  des EM-Kalorimeters abdeckenden Crates schwankende Offsets, die auf folgende Abschätzung des Fehlers führen:

$$\Delta t_{FitCr.2+3} = -2.22 \text{ ns} \pm 1.79 \text{ ns}_{Stat} \pm 0.79 \text{ ns}_{Sys} \quad (5.6)$$

Dieser Fehler genügt der ermittelten Toleranz von  $5 \text{ ns}$ . Das Offset von  $-2.22 \text{ ns}$  ist nicht zu vernachlässigen.

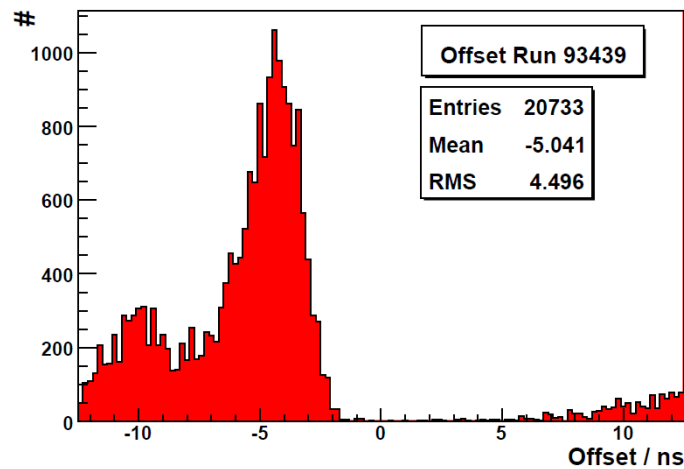
Für Crate 0 und 1, die mit  $|\eta| < 1.6$  hauptsächlich das elektromagnetische Barrel abdecken, ergeben sich Breiten der Korrelation von etwa  $3 \text{ ns}$ . Zudem liegt das Offset

<sup>7</sup>Beachte, dass in einigen Läufen nur die Crates 0 und 2 auf der A Seite ausgewertet wurden. Die C-Seite weist springendes Timing gegenüber der A-Seite auf, die den Trigger bestimmt und ist daher nicht sinnvoll auszuwerten. Dieses Problem existierte zum Zeitpunkt der Datennahme und wurde mittlerweile behoben.

bei stark negativen Werten, auf die korrigiert werden muss. Mittelt man dies, so ergibt sich eine Ungenauigkeit der Fine-Timing-Vorhersage für das von:

$$\Delta t_{FitCr.0+1} = -5.13 \text{ ns} \pm 2.78 \text{ ns}_{Stat} \pm 0.34 \text{ ns}_{Sys} \quad (5.7)$$

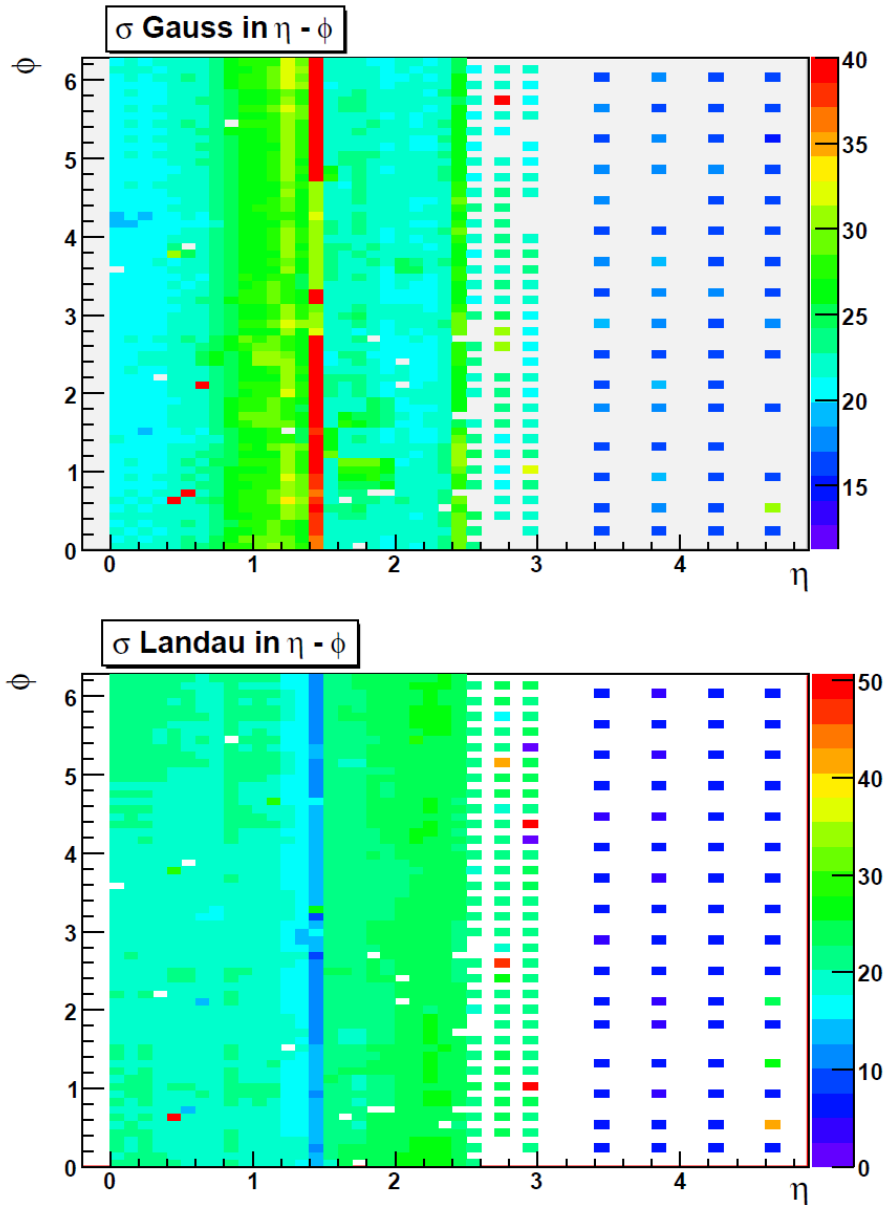
Der Fehler liegt unter den fünf Nanosekunden Toleranz aus der Simulationsstudie. Das große Offset mit  $-5.13 \text{ ns}$  kann nicht vernachlässigt werden, es wird sich aber korrigieren lassen. Diese Ergebnisse werden sich noch auf eine Präzision ähnlich der in den anderen Bereichen verbessern lassen, indem die variierenden Signalbreiten berücksichtigt werden.



**Abb. 5.20:** Verteilung des Achsenabschnittes der Korrelation des LAr-Phos4-Scans 93439. Enthalten sind Daten von Crate 0, 2 und 4.

Diese Fehler führen dazu, dass man etwa in den Bereich der vorgegebenen Toleranz kommt. Es werden Resultate des Runs 94309 betrachtet, der Pulsersignale der A-Seiten Crates 0, 2 und 4 enthält. Abbildung 5.20 zeigt die Verteilung des Achsenabschnittes der einzelnen Kanäle. Man erkennt ein klares Maximum von schmaler Breite, welches bei Werten negativen Achsenabschnittes liegt. Zudem gibt es links des Maximums ein kleines, weniger ausgeprägtes Maximum, dessen Ende zu negativen Werten abgeschnitten ist und sich rechts anschliesst. Daher ist der Wert der Standardabweichung vergrößert. Stark streuende Korrelationen deuten auf variierende Pulsformen in  $\eta$  hin. Daher sind in Abbildung 5.21 die Werte der Breiten des Fits an das rekonstruierte Phos4-Signal in  $\eta - \phi$  aufgetragen.

Es zeigt sich, dass in der Überlapp-Region des EM-Kalorimeters, wo die zentrale Barrel-Region und die Endkappe sich überlagern (siehe Abschnitt 2.1), insbesondere bei  $|\eta| = 1.45$ , die Signalform von der sonstigen Form abweicht. Auch in den benachbarten Regionen dieses  $\eta$  Streifens beobachtet man variierende Pulsform. Wie



**Abb. 5.21:** (Oben):  $\sigma_G$  [ns] aus Fit des rekonstruiertem Phos4-Scans 93439 in  $\eta - \phi$  der A Seite , (unten):  $\sigma_L$  [ns] analog.

im nächsten Abschnitt gezeigt wird ist eine Variation von  $\sigma_G$  bzw.  $\sigma_L$  mit einer Veränderung des Achsenabschnittes verbunden. Daher ist es nicht verwunderlich, dass sich für Crates 0 und 1, die die Regionen bis  $|\eta| \leq 1.55$  abdecken, sich die ermittelten Streuungen ergeben. Diese Resultate würden voraussichtlich verbessert, behandelte man die Trigger-Tower oder wenigstens gewisse Bereiche in  $\eta$  separat. In den hier dargelegten Studien werden die Crates nur uniform behandelt.

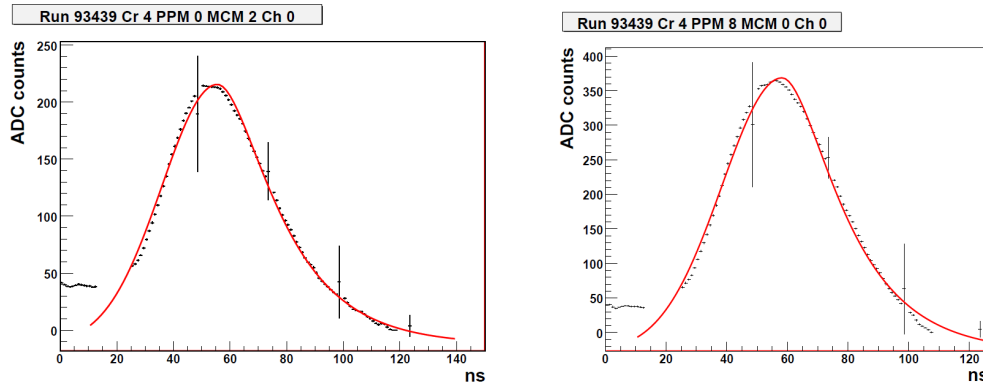
Desweiteren entnimmt man der Tabelle das Resultat für den Fehler des Timings



für Crate 4. Crate 5 wird nicht in das Ergebnis mit eingebunden, da nur ein Phos4-Scan vorliegt. Aus Symmetriegründen würde man allerdings ähnliche Resultate für beide Crates erwarten. Die ermittelten Breiten betreffen die LAr Teile des hadronischen Kalorimeters, ausgenommen das Vorwärtskalorimeter. Es ergibt sich:

$$\Delta t_{FitCr.4had} = 2.18 \text{ ns} \pm 1.22 \text{ ns}_{Stat} \pm 0.87 \text{ ns}_{Sys} \quad (5.8)$$

Dieses Resultat liegt innerhalb des Bereiches von 5 ns.



**Abb. 5.22:** Zwei EM FCal Phos4-Signale. Man beachte die schmalen Signale und die Unterschreitung des Pedestal Niveaus. Das Pedestal und der Fit Bereich mussten variiert werden, um sinnvollen Fit zu erhalten.

Dennoch bereiten Crate 4 und 5 weitere Probleme, da die Signale der Trigger-Tower des Vorwärts-Kalorimeters im elektromagnetischen <sup>8</sup> und im hadronischen Bereich<sup>9</sup> eine Pulsform aufweisen, die sich mit der Gauss-Landau-Funktion nicht sinnvoll anpassen lässt. Die hier gut erscheinenden Fits lassen sich nur auf die Phos4-Signale anwenden, für das ADC-Signal aus 5 Werten ergeben sich keine sinnvollen Resultate. Abbildung 5.22 zeigt ein Phos4-Signal des EM FCal links und eines des hadronischen FCals rechts. Ein weiteres EM FCal Signal war in Abbildung 5.8 rechts zu sehen. Beide Pulse sind extrem schmal und zeigen innerhalb des sichtbaren Bereiches das LAr typische Unterschreiten des Pedestal Niveaus. Dies macht die FCal Pulsformen nicht zugänglich für Fits mit der rein positiven Gauss-Landau-Funktion. Weitergehende Studien könnten durch individuelles Betrachten der FCal Regionen die Resultate durch Fits verbessern. Eine neu konstruierte Funktion für die Fit-Methode im FCal zu verwenden, wäre vermutlich die geeignetere Lösung.

Das Problem, geeignete Werte für  $\sigma_{Gauss}$  und  $\sigma_{Landau}$  zu finden, wird im nächsten Abschnitte erneut behandelt. Unter anderem gilt es zu verstehen, wie diese Wahl die Breite und den Achsenabschnitt der Korrelation und somit unseren Fehler der Timing Vorhersage beeinflusst.

<sup>8</sup>Crate 4+5, PPM 0, d.h.  $2 \times 64$  Kanäle.

<sup>9</sup>Crate 4+5, PPM 8,  $2 \times 64$  Kanäle.

## Systematische Studien

Im Folgenden werden Zusammenhänge untersucht, die Aufschluss geben sollen, wie stabil die Ergebnisse der Fit-Methode unter einer Wahl der Breiten  $\sigma_G$  und  $\sigma_L$  sind. Es wird die Fit-Methode mit Werten von  $\sigma_G$  und  $\sigma_L$  auf einem Gitter mit Abstand von 0.05 BC angewendet und der Achsenabschnitt und die zugehörige Breite der Korrelation jedes Punktes bestimmt. Für einen Datensatz eines Phos4-Scans werden die oben erläuterten Werte der Breite und des Achsenabschnittes in die  $\sigma_G - \sigma_L$ -Ebene abgebildet.

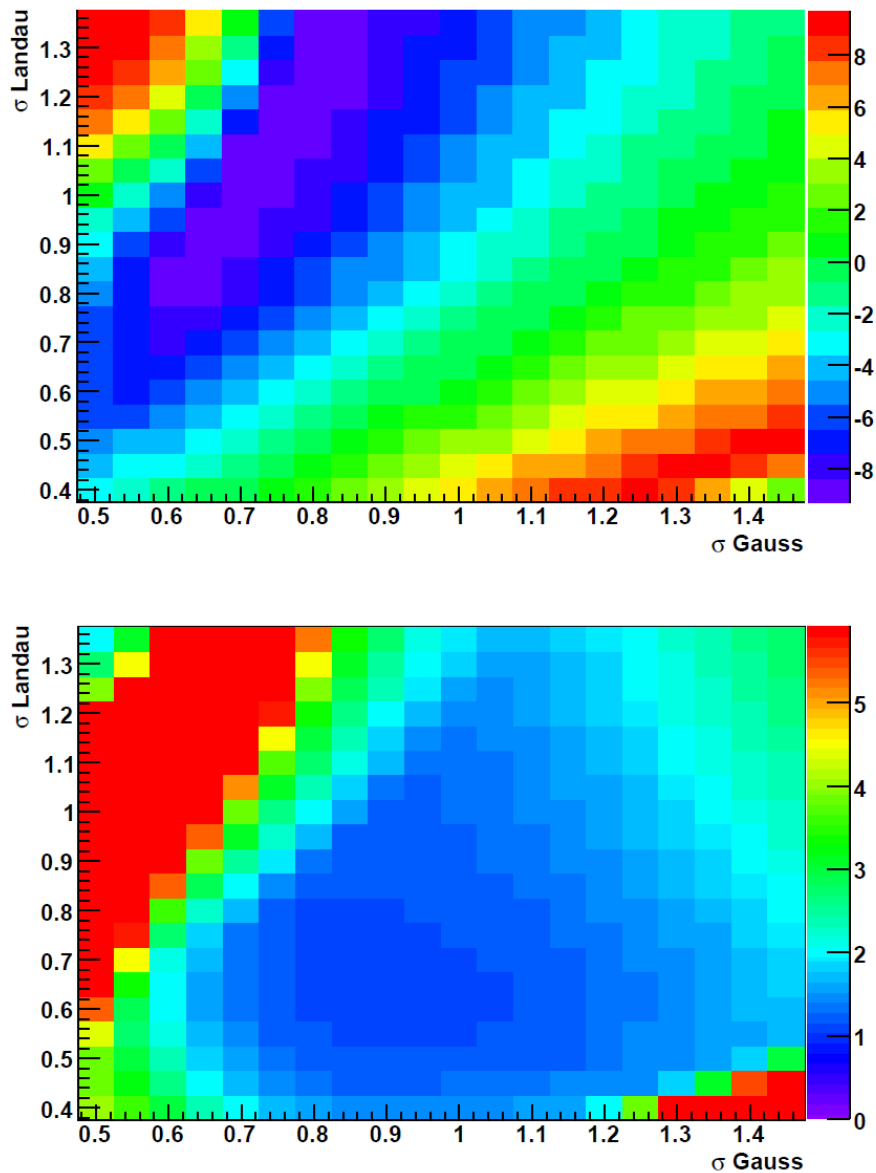
Die Abhängigkeit des Achsenabschnittes von  $\sigma_G$  und  $\sigma_L$  ist in Abbildung 5.23 oben zu sehen. Man sieht, dass die Werte des geringsten Betrages des Achsenabschnittes (in grün) in einer Umgebung des Verhältnisses  $\frac{\sigma_L}{\sigma_G} \approx 0.6$  liegen. Weicht man von dieser Region in Richtung größerer  $\sigma_G$  ab, so wachsen die Werte des Achsenabschnittes, in Richtung zu größeren  $\sigma_L$  fallen die Werte. In beide Richtungen erhält man eine Abweichung von ca. 1 ns zum Achsenabschnitt in die entsprechende Richtung bei einem Schritt von 0.05 BC. In den Ecken links oben und rechts unten befinden sich erneut kleine Achsenabschnitte, die durch gleichmäßiges Streuen der Resultate über den gesamten Bereich des Achsenabschnittes entstehen.

Zu dieser Ebene des Achsenabschnittes betrachtet man in Abbildung 5.23 unten die entsprechende Verteilung der Breiten der Korrelation. Die Region der geringsten Breite befinden sich in einer Umgebung des Punktes  $(\sigma_G, \sigma_L) = (0.9 \text{ BC}, 0.6 \text{ BC})$  mit einem Radius von etwa 0.1 BC. Die Werte der Breite der Korrelation liegen in dieser Gegend unter 1.5 ns. Nach außen nehmen die Werte der Breiten zu, bis hin zu Breiten von über 6 ns in den äußersten Regionen, in denen die Signalform durch die Breiten nicht mehr beschrieben wird und daher der Fit keine zuverlässigen Ergebnisse liefert.

Um bestmögliche Resultate der Fit-Methode zu erhalten, muss die Fit-Methode in der Schnittmenge der Region der geringsten Breiten und des Achsenabschnittes um 0 durchgeführt werden. Das heißt, die Breiten von  $\sigma_G$  und  $\sigma_L$ , die man für den 2-Parameter-Fit fixiert, sind aus dieser Region zu wählen. Anhand von Abbildung 5.23 schätzen wir die Umgebung als einen Kreis mit Radius von 0.1 BC in  $\sigma_G$  und  $\sigma_L$  um den Punkt  $\sigma_G = 0.95 \text{ BC}$  bzw.  $\sigma_L = 0.6 \text{ BC}$  ab. Verbunden mit dieser Wahl der Umgebung ist ein Fehler in der Voraussage der Fine-Timing-Analyse von  $\pm 2 \text{ ns}$  als Fehler durch Streuung der Resultate um ideale Korrelation.

$$\Delta t_{FitTile} = \pm 2 \text{ ns}_{Stat} \pm 2 \text{ ns}_{Sys} \quad (5.9)$$

Die Streuung des Achsenabschnittes liefert einen systematischen Fehler von ebenfalls ca.  $\pm 2 \text{ ns}$ . Dies ist das vorläufige Ergebnis der Präzision der Fit-Methode im Tile-Kalorimeter aus der Stabilitätsstudie. Dieses Ergebnis ist weniger genau als die oben gegebene Auswertung der Korrelationen, stimmt aber in den Fehlern überein mit obiger Aussage. Der Mittelwert der Achsenabschnitte ist nicht im Ergebnis enthalten.

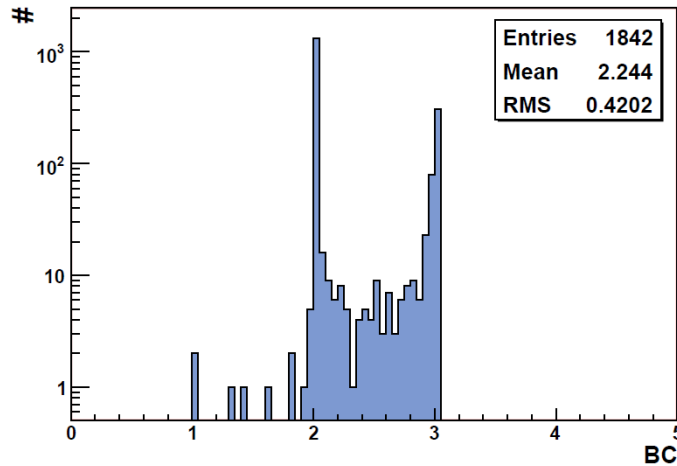


**Abb. 5.23:** (Oben): Achsenabschnitt der Korrelationsverteilungen in  $\sigma_G - \sigma_L$  des Phos4-Scans 101357 für Crate 6 des Tile-Kalorimeters. (unten): Zugehörige Breiten der Verteilung in  $\sigma_G - \sigma_L$ .

## 5.5 Anwendung der Fit-Methode im Commissioning

In der Inbetriebnahmephase wurde gegen November des Jahres 2008 damit begonnen Fine-Timing-Korrekturen in das System des Level-1 Kalorimeter-Triggers für die einzelnen Kanäle aufzunehmen. Es zeigt sich, dass die in diesen Studien ermittelten Phos4-Korrekturen für ein stabileres Timing von etwa 10-20 % der Kanäle sorgt. Die

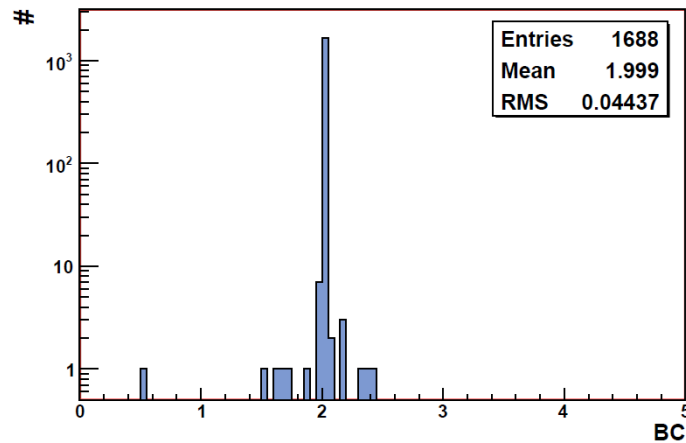
Abbildung 5.24 zeigt das Timing der Trigger-Tower des Energy-Scans 94410 vom 08.11.2008. Es handelt sich hierbei um einen Pulsler Lauf im Tile-Kalorimeter.



**Abb. 5.24:** Timing des Tile Pulsar Laufes 94410. Eingetragen ist die mittlere Position des Digitalen Maximums pro Trigger-Tower. Einige Trigger-Tower springen zwischen den Positionen 2 und 3.

Für jeden Trigger-Tower werden die Positionen der ADC-Maxima der Ereignisse gemittelt und in das Diagramm eingetragen. Nicht ganzzahlige Werte entsprechen Trigger-Towern, deren Maximum zwischen verschiedenen Positionen gesprungen ist. Der Großteil der Trigger-Tower besitzt bereits stabiles Timing und hat Einträge bei BC 2 oder 3. Die stabilen Trigger-Tower mit dem Maximum im dritten BC benötigen theoretisch nur eine Coarse-Timing-Korrektur von einem BC, um ebenfalls stabil zentriert zu liegen. Die springenden Kanäle benötigen eine Fine-Timing-Korrektur, da nur diese das Springen der ADC-Signale zwischen mehreren Strahlkreuzungen verhindern kann.

Dieselbe Analyse wurde für den Tile Pulsar Lauf 98464 vom 10.12.2008 durchgeführt, nachdem seit dem 8.11.2008 schrittweise Verbesserungen des Coarse- und Fine-Timings vorgenommen wurden. Abbildung 5.25 zeigt das Ergebnis dieses Laufes. Beinahe alle Trigger-Tower besitzen ein stabiles Timing mit zentriertem Maximum im zweiten BC. Nur ein einzelner Trigger-Tower hat eine mittlere Position des Maximums, die außerhalb des Abstandes von einer Strahlkreuzung vom Zentrum bei BC zwei liegt. Es ist möglich, dass dieser Trigger-Tower aufgrund behobener Probleme zum ersten Mal in diesen Lauf aufgenommen wurde und bisher keine Timing Korrekturen erhalten hatte. Man muss anmerken, dass die Zahl der beteiligten Trigger-Tower dieses Laufes geringer ist, als in Lauf 94410, da zu dieser Zeit bereits die Abschaltung des Detektors für Reparaturarbeiten im Winter kurz bevor stand.



**Abb. 5.25:** Timing des Tile Pulser Laufes 98464. Eingetragen ist die mittlere Position des digitalen Maximums pro Trigger-Tower. Das Timing der meisten Trigger-Tower ist stabil im Zentrum bei 2.

Man erkennt, dass insbesondere das Fine-Timing, d.h. die Stabilität des Timings, durch iteriertes Ermitteln von Coarse- und Fine-Timing-Korrekturen verbessert wurde. Allerdings sind die hier verwendeten Korrekturen aus den Phos4-Scans ermittelt worden und nicht durch die Fit-Methode bestimmt. Die im vorigen Abschnitt ermittelten Achsenabschnitte und Breiten zeigen, dass keine großen Unterschiede auftreten sollten.

Dies ist die Methode, mit der in der Praxis gute Feinsynchronisierung hergestellt werden wird. Zunächst wird das Coarse-Timing berichtigt, so dass die ADC-Maxima zentriert werden und die Fit-Methode anwendbar wird. Dann wird ein Datensatz genommen, aus dem die Fine-Timing-Korrekturen für das Kalorimeter-Triggersystem ermittelt werden. Diese werden in das System eingebracht und ein neuer Datensatz wird genommen um eventuelle Veränderungen des Coarse-Timings durch die Fine-Timing-Korrekturen festzustellen, usw. Es entsteht ein iterativer Prozeß, während dessen das Timing sich schrittweise dem Idealzustand annähert. Wenn das Timing für Kollisionsdaten sich genauso schnell verbessert, wie für Pulser Daten, ist mit zwei bis drei benötigten Iterationen des Vorgangs zu rechnen, bis man die planmäßige Synchronität aller Kanäle erreicht hat.



## 6. Zusammenfassung und Ausblick

Die Synchronität der Kanäle des Level-1 Kalorimeter-Trigger Pre-Prozessors ist entscheidend für die stabile Arbeitsweise und die Energiemessung des Kalorimeter-Triggers der ersten Stufe. Diese Arbeit entwickelt und evaluiert eine Methode, die es gestattet, die Synchronität des Pre-Prozessors für alle Kanäle mit Nanosekunden-Präzision herzustellen. Dabei wird von uniformer Pulsform der Signale auf Pre-Prozessor-Ebene ausgegangen und eine Gauss-Landau-Funktion verwendet, um damit die digitalen Signale zu fitten.

In einer Simulation mit Signalen aus kosmischen Teilchen wurde die prinzipielle Anwendbarkeit der Methode nachgewiesen. Desweiteren wurde simuliert, welche Anforderungen an die Fit-Methode bestehen, um eine Genauigkeit von 2% in der Energiemessung zu erreichen. Die erforderliche Präzision für das Tile (LAr) Kalorimeter beträgt etwa 6 (5) ns. Außerdem wurde in der Simulation der maximal entstehende Fehler der Energiemessung für den Kalorimetertrigger, durch Abweichung der Digitalisierung vom Maximum des analogen Pulses, auf etwa 10% abgeschätzt.

Die Methode zur Bestimmung der Feinsynchronisation durch Fitten wurde beschrieben. Durch Analyse von Pulserdaten wurde gezeigt, dass diese Methode den ermittelten Anforderungen genügt, indem die Ergebnisse der Fit-Methode mit den entsprechenden Resultaten aus Delay-Scans, in denen die Referenz-Clock der Digitalisierung schrittweise um Nanosekunden gegenüber der Signalerzeugung verzögert wird, verglichen wurden. Es wurden zunächst die Datensätze der Phos4-Scans aus den Rohdaten des Detektors im Rahmen dieser Arbeit rekonstruiert und ausgewertet. Die Fit-Methode zeigt sehr gute Resultate für das Tile-Kalorimeter, in dem die Vorhersage der Timing-Korrekturen bis auf einen Fehler von  $\pm 1.42 \text{ ns}_{Stat} \pm 0.64 \text{ ns}_{Sys}$  mit denen der Delay-Scans übereinstimmt und somit die geforderten 6 Nanosekunden Toleranz sicher einhält. Weitere systematische Studien unterstützen die ermittelten Resultate und zeigen, dass die Methode ausreichend stabil gegenüber Abweichungen von etwa 10% in den die Signalform beschreibenden Parametern ist.

Im LAr-Kalorimeter führt die Fit-Methode ebenfalls zu Ergebnissen, die es gestatten, die Kanäle innerhalb der fünf Nanosekunden-Toleranz zu synchronisieren. Uniformes Betrachten des Pre-Prozessors in Regionen vergleichbarer Pseudorapidität führt zu einer Genauigkeit der Methode von  $\pm 2.78 \text{ ns}_{Stat} \pm 0.34 \text{ ns}_{Sys}$  im zentralen Bereich des elektromagnetischen Kalorimeters und  $\pm 1.79 \text{ ns}_{Stat} \pm 0.79 \text{ ns}_{Sys}$  in der Region der Endkappen. Im hadronischen Kalorimeter werden  $\pm 1.22 \text{ ns}_{Stat} \pm 0.87 \text{ ns}_{Sys}$  als Präzision der Fit-Methode im Endkappenbereich erzielt. Ausgenommen sind in beiden Kalorimetern die Regionen der Vorwärtskalorimeter, mit je  $2 \times 64$  Kanälen, de-

ren Pulse das Nullniveau der Kanäle unterschreiten und einem Fit mit der positiven Gauss-Landau-Funktion nicht zugänglich sind. Es wurde somit die Anwendbarkeit der Fit-Methode anhand von Pulserdaten im gesamten Kalorimeter, mit Ausnahme des FCals, innerhalb der geforderten Genauigkeit gezeigt.

In der Inbetriebnahmephase des Detektors wurden bereits im Rahmen dieser Arbeit bestimmte Fine-Timing-Korrekturen verwendet. Dabei hat sich der vorhergesagte positive Effekt auf die Stabilität des Triggers bestätigt. Bis die Fit-Methode, voraussichtlich im September oder Oktober des nächsten Jahres, auf Daten aus Kollisionen angewendet werden kann, gilt es nun, die entwickelten Methoden in die offizielle ATLAS-Offline-Analyse-Software, genannt ATHENA, zu integrieren.



## Literaturverzeichnis

- [1] G. Aad *et al.* [ATLAS Collaboration], “The ATLAS Experiment at the CERN Large Hadron Collider,” JINST **3** (2008) S08003.
- [2] F. Föhlich, “Calibration for the Atlas Level 1 Kalorimeter Trigger”, Dissertation Heidelberg 2007.
- [3] S. Weinberg, “A Model Of Leptons,” Phys. Rev. Lett. **19** (1967) 1264.
- [4] P. W. Higgs, “BROKEN SYMMETRIES AND THE MASSES OF GAUGE BOSONS,” Phys. Rev. Lett. **13**, 508 (1964).
- [5] D. Abbaneo *et al.* [ALEPH Collaboration and DELPHI Collaboration and L3 Collaboration and ], “A combination of preliminary electroweak measurements and constraints on the standard model,” arXiv:hep-ex/0112021.
- [6] H. Murayama, “Supersymmetry phenomenology,” arXiv:hep-ph/0002232.
- [7] C. Nöding, “Suche nach Neuer Physik in Elektron-Tau Endzuständen in Proton-Antiproton Kollisionen bei 1.96 TeV”, Dissertation, Universität Freiburg 2006.
- [8] C. Amsler *et al.* [Particle Data Group], “Review of particle physics,” Phys. Lett. B **667** (2008) 1.
- [9] N. Arkani-Hamed, S. Dimopoulos and G. R. Dvali, “The hierarchy problem and new dimensions at a millimeter,” Phys. Lett. B **429** (1998) 263 [arXiv:hep-ph/9803315].
- [10] R. Achenbach *et al.*, “The ATLAS level-1 calorimeter trigger,” JINST **3** (2008) P03001.
- [11] N. J. Buchanan *et al.*, “ATLAS liquid argon calorimeter front end electronics,” JINST **3** (2008) P09003.
- [12] P. Hanke, “The Pre-Processor Module (PPM) for the ATLAS Level-1 Calorimeter Trigger”, Draft Version Heidelberg, Feb. 2008.
- [13] U. Pfeiffer, “A Mixed Signal Multi-Chip Module With High Speed Serial Output Links For The Atlas Level-1 Trigger,” IEEE Trans. Nucl. Sci. **47** (2000) 1463.

- [14] J. Colas *et al.*, "Electronics Calibration Board For The Atlas Liquid Argon Calorimeters", Nucl. Instrum. Meth. A **593** (2008) 269.
- [15] K. Schmitt, Private Mitteilung.
- [16] B. Gosdzik, "Comparison of Calorimeter Signals with Trigger Signals at the ATLAS Experiment", Diplomarbeit Universität Heidelberg 2007.
- [17] M. Wessels, Private Mitteilung.
- [18] J. P. Seidler, "fine timing studies", Level-1 Calorimeter Trigger Weekly Phone Meeting, <http://indico.cern.ch/conferenceDisplay.py?confId=37249>.
- [19] D. Hadley, "FIR Filter From Phos4", Level-1 Calorimeter Trigger General Meeting, <http://indico.cern.ch/conferenceDisplay.py?confId=45561>.
- [20] J. P. Seidler, "Update on Nanosecond Timing", Level-1 Calorimeter Trigger Joint Meeting, <http://indico.cern.ch/conferenceDisplay.py?confId=30116>.

## Danksagung

Im Rahmen dieser Diplomarbeit haben mir viele Personen geholfen und allen gilt mein Dank, auch wenn ich einige nicht namentlich erwähne.

Zunächst möchte ich Herrn Professor Schultz-Coulon dafür danken, mir diese Diplomarbeit angeboten zu haben und mich mit freundlichem Beistand durch das Jahr begleitet zu haben. Außerdem möchte ich Herrn Professor Herrmann dafür danken die Zweitkorrektur zu übernommen zu haben.

Mein besonderer Dank gilt Rainer Stamen, der mich in allen Belangen die gesamte Zeit über hervorragend betreut hat und jederzeit Ideen für jede Menge weiterer Arbeit bereit hält. Desweiteren danke ich der gesamten KIP Hochenergiephysikgruppe und auch den ATLAS-Leuten am CERN für das angenehme Umfeld und das gute Klima im letzten Jahr. Ein Gruß an die Sportfreunde um den ATLAS-Kicker.

Für die Korrekturen an dieser Diplomarbeit möchte ich danken: Rainer Stamen, Markos Maniatis, Felix Müller, Michael Henke, Thorsten Dietzsch und Alexander Tadday sowie Marieke und Annemarie Seidler.

Besonders danken möchte ich auch meinen Eltern, die mir ein ruhiges Studium der Physik in Heidelberg ermöglicht haben.

Zuletzt möchte ich mich für viele schöne Stunden außerhalb der Welt der Physik bei allen Mitbewohnern und Freunden der FK17 bedanken.



Ich versichere, dass ich diese Arbeit selbständig verfasst und keine anderen, als die  
angegeben Quellen und Hilfsmittel benutzt habe.

Heidelberg, den 25.02.2009

.....

(Jan-Paul Seidler)