

**Department of Physics and Astronomy
University of Heidelberg**

Bachelor Thesis in Physics
submitted by

Charlotte Debus

born in Frankfurt am Main (Germany)

2010

Untersuchung zur Betriebsstabilität des PreProzessors des ATLAS Level 1-Kalorimeter-Triggers

This Bachelor Thesis has been carried out by Charlotte Debus at the
Kirchhoff-Institute for Physics in Heidelberg
under the supervision of
Prof. Hans-Christian Schultz-Coulon

Abstract

The PreProcessor is an important component of the ATLAS Level 1 Calorimeter-Trigger, which digitises about 7200 analogue channels, determines the bunchcrossing of each interaction and calibrates the energy of the digitised signal. In the following bachelor thesis an analysis of the pedestal, an offset-parameter of the PreProcessorModul, is presented. A stable behaviour of the pedestal is important to guarantee a good operating stability of the trigger, since a variation in the pedestal can influence the trigger rates. A study of average pedestals as well as its shortterm and longterm development has been performed in order to characterize the behaviour of the pedestal.

Der PreProzessor ist eine wichtige Komponente des ATLAS Level 1-Kalorimeter-Triggers, der die Signale von 7200 analogen Kanälen digitalisiert, den Zeitpunkt der Strahlkreuzung der Wechselwirkung bestimmt und die Energie der digitalisierten Signale kalibriert. Im Folgenden wird die Analyse des Pedestals, einem Offset-Parameter des PreProzessorModuls, vorgestellt. Eine Betriebsstabilität dieses Pedestals ist wichtig für das Verhalten des Triggers, da ein variierendes Pedestal Einfluß auf die Trigger rates hätte. Es wurden Studien des mittleren Pedestals sowie des langzeitigen und kurzzeitigen Verlaufes angestellt, um das Verhalten des Pedestals zu charakterisieren.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	2
1.1	Physik am LHC	3
1.2	Der LHC und das ATLAS Experiment	4
1.3	Der Level 1 Kalorimeter Trigger	8
2	Analyse	12
2.1	Motivation	13
2.2	Pedestals	13
2.3	Datensätze	13
2.4	Pedestalberechnung und Datenauswahl	15
2.4.1	Berechnung der Pedestals aus den ADC-Werten	15
2.4.2	Ereignis-Selektion	15
2.5	Datenanalyse	16
2.5.1	Mittelwerte und Differenzen zwischen Runs	16
2.5.2	Kurzzeitige Variationen des Pedestals	20
2.5.3	Langzeitige Variationen des Pedestals	24
2.6	Pedestals und L1_EM Raten	28
2.7	Diskussion der Ergebnisse	30
3	Zusammenfassung	31
A	CoolID	37
B	Das PPM	39
C	Mittelwerte und Differenzen zwischen Runs	41
D	Kurzzeitige Variationen des Pedestals	46
E	Langzeitige Variationen des Pedestals	51

Kapitel 1

Einleitung

1.1 Physik am LHC

In den letzten Jahrzehnten ist es in der Physik gelungen mithilfe von Beschleunigerexperimenten immer detailliertere Kenntnisse über fundamentale Teilchen und ihre Wechselwirkung zu erlangen. Das etablierte Modell, um fundamentale Materieteilchen und ihre Wechselwirkungskräfte zu beschreiben, wird als Standard-Modell der Teilchenphysik bezeichnet. Es wurde in vielen Experimenten getestet und mit hoher Präzision bestätigt. Allerdings bleiben einige Fragen ungeklärt, zum Beispiel: Woher kommt die Masse? Warum ist die Gravitation so viel schwächer als die anderen drei bekannten Kräfte¹ (Hierarchieproblem)? Die theoretischen Vorhersagen postulieren innerhalb des Standard-Modells ein neues Teilchen, das Higgs-Boson, um die Unklarheiten zur Masse zu beseitigen. Auch Erweiterungen des Standardmodells, wie z.B. die Supersymmetrie, bei dem jedem Teilchen ein sogenannter Superpartner zugeordnet wird, oder Extradimensionen wären denkbar. Dies könnte auch die in der Astrophysik auftauchenden Fragen nach dem Ursprung der dunklen Materie klären. Demnach wäre das Neutralino, ein supersymmetrisches Wechselwirkungsteilchen, für die dunkle Materie verantwortlich.

Um Aufschluss über diese Theorien zu erhalten, lässt man Teilchen mit sehr hohen Energien kollidieren, die dann neue, zum Teil unbekannte Teilchen bilden können. Allerdings haben die Entstehungsprozesse dieser Teilchen im derzeitig erreichbaren Energiebereich nur sehr geringe Wirkungsquerschnitte. Der Wirkungsquerschnitt eines Physikprozesses beschreibt die Wahrscheinlichkeit, mit der es zu der dem Prozess zugehörigen Wechselwirkung und damit Teilchenentstehung kommt. Die zu beobachtenden Raten der Wechselwirkung sind proportional zu diesem Wirkungsquerschnitt:

$$\dot{N} = \sigma \cdot \mathcal{L} \quad (1.1)$$

Der Proportionalitätsfaktor \mathcal{L} ist die instantane Luminosität, welche den kollidierenden Teilchenstrahl und seine Beschaffenheit beschreibt. Sie wird bestimmt durch den Strahlquerschnitt, die Teilchendichte des Strahls und die Kollisionsfrequenz und hat die Dimension $[cm^{-2}s^{-1}]$. Die integrierte Luminosität ist definiert als zeitliches Integral der instantanen Luminosität: $L = \int \mathcal{L} dt$. Man benötigt also eine hohe Luminosität oder lange Messzeiten, um bei den geringen Wirkungsquerschnitten genügend Ereignisse zu beobachten. Der Large Hadron Collider (LHC) gewährleistet eine hohe Luminosität.

Die sogenannte Schwerpunktsenergie wird verwendet, um die für die Wechselwirkung zur Verfügung stehende Energie zu beschreiben. Sie ist definiert als Quadrat der Summe von Viererimpulsen der kollidierenden Teilchen: $\sqrt{s} = \sqrt{(P_1 + P_2)^2}$. Wie aus der tiefinelastischen Streuung bekannt ist, besitzt das Proton eine Substruktur aus Partonen (Quarks und Gluonen), d.h. in einer Kollision wechselwirken zwei Partonen miteinander. Die effektive Schwerpunktsenergie ist daher im Allgemeinen geringer als die der Protonenkollision. Da die Impulsverteilung der Partonen innerhalb des Protons nicht einen diskreten Wert hat, sondern kontinuierlich ist (Strukturfunktion des Protons), ist die invariante Masse bei den Kollisionen jeweils unterschiedlich. Präzisionsmessungen sind deswegen mit solchen Protonenkollisionen nicht möglich.

Um Teilchenkollisionen mit hohen Schwerpunktsenergien und Raten zu erhalten, werden vornehmlich Ringbeschleuniger verwendet, in denen die Teilchen durch viele Umläufe schrittweise beschleunigt werden können. Zu diesem Zweck wurde der Large Hadron Colli-

¹Elektromagnetische, starke und schwache Wechselwirkung

der am CERN gebaut. Der LHC ist ein Hadronen²-Speicherring bei Genf, an dem Protonen bzw. Schwerionen auf Energien bis zu 7 TeV beschleunigt und zur Kollision gebracht werden.

1.2 Der LHC und das ATLAS Experiment

Der Beschleuniger

Der LHC befindet sich etwa 100 Meter unter der Erde in einem Tunnel mit einem Durchmesser von 3,8 m und einem Umfang von 27 km. Die zu beschleunigenden Teilchen (Hadronen) werden nach einigen Vorbeschleunigern (Linac2, PSB, PS, SPS) mit Energien von 450 GeV in zwei Vakuumröhren eingeleitet und in zwei entgegentlaufenden Strahlen auf jeweils bis zu 7 TeV beschleunigt. Damit stehen schließlich bis zu 14 TeV Schwerpunktsnergie bei den Kollisionen zur Verfügung. Im weiteren Verlauf wird zur Vereinfachung nur die Protonenbeschleunigung und -kollision betrachtet.

Zur Unterscheidung zwischen den Raten der interessanten Physikprozesse und dem QCD³-Untergrund wird, aufgrund der nur sehr geringen Wirkungsquerschnitte, eine hohe Luminosität bis zu einer angestrebten Spitzenluminosität von $1 \cdot 10^{34} \text{cm}^{-1} \text{s}^{-1}$ benötigt. Für die hierfür relevante Protonendichte des Strahls werden die Protonen zu Paketen, den sogenannten "Bunches", zusammengefasst, wobei ein Bunch $1,15 \cdot 10^{11}$ Protonen enthält. Es können bis zu 2808 Bunches gleichzeitig im Ring beschleunigt werden.

Zur Beschleunigung werden 16 supraleitende Hochfrequenz-Hohlraumresonatoren mit Beschleunigungsspannungen von bis zu 5.5 MV pro Meter verwendet. Die Protonen werden durch 1232 supraleitende Dipolmagneten in einem Magnetfeld mit einer Stärke von 8,3 T auf eine Kreisbahn mit einem Krümmungsradius von 2800 m gelenkt. Zur Strahlfokussierung werden 392 Quadrupol- und etwa 4800 Multipolmagnete verwendet. Um die Supraleitung der Magnete zu gewährleisten, ist das ganze System auf 1,9 K gekühlt[5].

Bei Elektron-Positron-Beschleunigern bildet die Synchrotronstrahlung⁴ den limitierenden Faktor für die Energie. Am LHC hingegen verlieren die Protonen aufgrund ihrer größeren Masse pro Umlauf nur einige Kiloelektronenvolt durch diese Strahlung, was um den Faktor hundert kleiner ist als die 0,5 GeV, die pro Umlauf gewonnen werden.

Die Protonenbunches können an vier Kollisionspunkten zur Wechselwirkung gebracht werden. Dort befinden sich die Detektoren der vier LHC Experimente ATLAS⁵, CMS⁶, ALICE⁷ und LHCb⁸. ATLAS und CMS sind Universaldetektoren, die zur Suche nach dem Higgs-Boson oder neuer Physik verwendet werden. Das LHCb-Experiment untersucht mittels Entstehung und Zerfall von B-Mesonen die Eigenschaften der CP-Verletzung. ALICE ist optimiert zur Vermessung von Schwerionenkollisionen, mithilfe derer ein Quark-Gluon-Plasma erzeugt wird, um einen ähnlichen Zustand wie kurz nach dem Urknall zu simulieren. Der LHC wurde im November 2009 nach einigen technischen Komplikationen in Betrieb genommen.

²Teilchen, die aus Quarks zusammen gesetzt sind (Baryonen und Mesonen)

³Quanten-Chromo-Dynamik

⁴Geladene Teilchen senden Strahlung aus, wenn sie im Magnetfeld abgelenkt werden, was zu einem Energieverlust führt

⁵**A** Toroidal LHC **A**pperatu **S**

⁶Compact Muon Solenoid

⁷**A** Large Ion Collider **E**xperiment

⁸Large Hadron Collider beauty

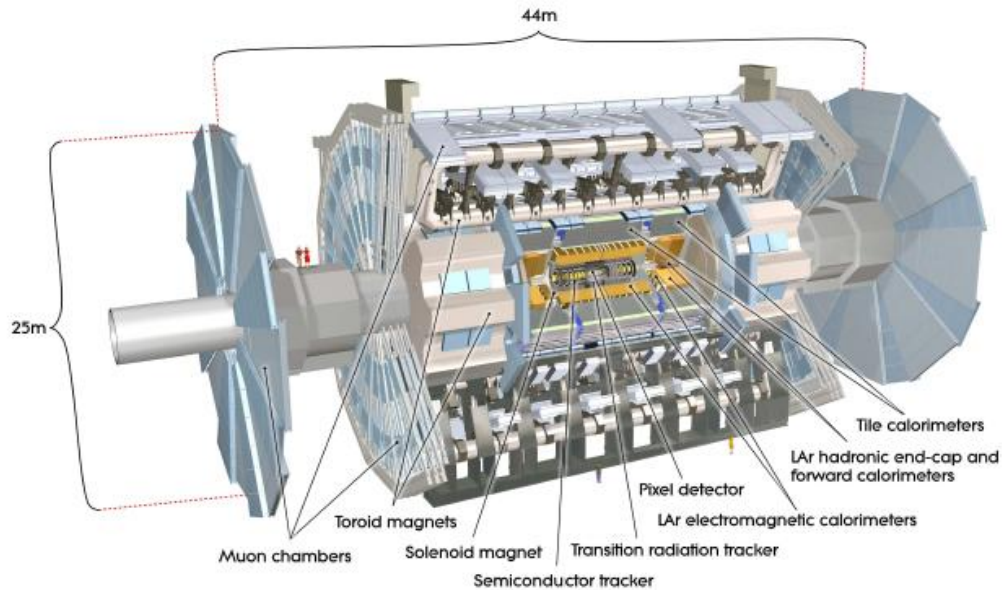


Abbildung 1.1: Querschnitt des ATLAS-Detektors [1]

Der ATLAS-Detektor

An dieser Stelle wird das ATLAS-Koordinatensystem eingeführt. Der Wechselwirkungspunkt wird als Koordinatenursprung definiert, von dem aus die z -Achse in Strahlrichtung verläuft. Die $x - y$ -Ebene steht dann transversal dazu. Der Azimutalwinkel ϕ wird in radiale Richtung um die Strahlachse herum gemessen, der Polarwinkel θ ist der Winkel zur Strahlachse hin. Man definiert die sogenannte Pseudorapidität als $\eta = -\ln(\tan(\theta/2))$. Generell werden basierend auf der Detektorgeometrie der Zentralbereich (Barrel), der bei η -Werten um 0 herum liegt, und der Endkappen-Bereich (EndCap), der sich bei großen Werten der Pseudorapidität befindet, unterschieden.

Der ATLAS-Detektor (Abb. 1.1) ist 45m lang, hat einen Durchmesser von 22m und ist 7000t schwer. Er ist in Bezug auf den Wechselwirkungspunkt symmetrisch aufgebaut [5]. Im Detektor kollidieren die Protonenpakete mit einer Frequenz von 40MHz. Bei einer solchen Strahlkreuzung finden etwa 23 inelastische Proton-Proton-Kollisionen statt (Pile-Up). Dadurch entsteht eine große Menge an auszulesenden Daten, was hohe Ansprüche an das Experiment stellt:

- Der Detektor ist ständig einer hohen Teilchenstrahlung ausgesetzt. Daher müssen Elektronik und Sensoren besonders strahlungsresistent sein.
- Zur Energiemessung werden Kalorimeter mit hoher Granularität⁹ verlangt, die nahezu den vollen Raumwinkel abdecken. Dies gewährleistet eine gute Trennung der einzelnen Teilchenschauer, was vor allem im elektromagnetischen Kalorimeter wichtig ist, um Elektronen und Photonen zu identifizieren.

⁹Unter der Granularität versteht man die Feinheit der Detektorzellen

- Die hohe Anzahl an Spuren, die die geladenen Teilchen durch Ionisation in den sogenannten Spurdetektoren hinterlassen, erfordert eine gute Auflösung des Orts, um die einzelnen Spuren voneinander unterscheiden zu können. Der Impuls wird durch die Ablenkung der Teilchen im Magnetfeld gemessen. Um eine hohe Rekonstruktionseffizienz der Teilchenspuren zu erlangen werden Vertexdetektoren benötigt, die durch hohe Ortsauflösung den primären Wechselwirkungspunkt der Protonen bestimmen.
- Ein Myonsystem identifiziert hochenergetische Myonen. Es hat eine hohe Impuls-Auflösung.
- Im Detektor kollidieren die Protonen viel häufiger als das Speichern von Ereignissdaten mit einer Frequenz von 200 Hz zulässt. Daher ist es nötig eine schnelle und effiziente Datenselektion vor dem Speichern der Ereignisse vorzunehmen.

Um den Wechselwirkungspunkt herum ist der innere Detektor, auch Tracking System genannt, aufgebaut. Er misst 7m in z-Richtung und hat einen Radius von 1,5m. Im inneren Teil ($|\eta| < 2.5$) bilden hochauflösende Halbleiter-Pixel- und Streifendetektoren die Spurdetektoren zur Impuls- und Vertexmessung. Die höchste Granularität findet man in den drei Lagen von Silizium-Pixel-Detektoren am Vertex, mit Pixelgrößen von $50 \times 400 \mu\text{m}$ in $R - \phi \times z$ und ca. 80,4 Millionen Auslese-Kanälen. Dahinter befinden sich 8 Lagen Halbleiter-Streifen der Silizium-Microstreifen-Tracker (SCT¹⁰). Im Zentral-Bereich werden Stereo-Streifen, die nur einen kleinen Winkelbereich in $R - \phi$ abdecken und parallel zur Strahlachse verlaufen, verwendet. In den Endkappen verlaufen die Streifen radial und senkrecht zum Strahl. Der SCT deckt den selben η -Bereich ab wie der Pixeldetektor.

Im äußeren Bereich befinden sich die sogenannten Straw Tubes der Übergangsstrahlungs-Tracker (TRT), die für die Elektronenidentifikation zuständig sind. Diese Röhren haben einen Durchmesser von 4mm, sind 37 cm lang und decken den äußersten Teil des Tracking Systems in einem Bereich von $|\eta| < 2.0$ ab. Sie bestehen aus Driftröhren und Übergangs-Strahlungs-Detektoren. Im Zentralbereich verlaufen sie parallel zum Strahl, im Endkappenbereich sind die Röhren radial angeordnet.

Beide Aufbauten bieten hochpräzise Messungen mit einer feinen Detektorgranularität. Durch einen zentralen Solenoid wird im inneren Detektor ein Magnetfeld von 2T erzeugt, in dem die Bahnen der geladenen Teilchen gekrümmt werden, woraus sich ihr Impuls bestimmen lässt.[1]

In den Kalorimetern deponieren die in der Kollision entstandenen Teilchen ihre Energie, die dann gemessen wird. Das ATLAS Kalorimeter-System besteht aus verschiedenen Sampling-Kalorimetern (Abb. 1.2). Diese decken einen Bereich von $|\eta| < 4,9$ ab und werden in elektromagnetische und hadronische Kalorimeter unterteilt. Sampling-Kalorimeter bestehen aus abwechselnd einem Absorber und einem aktiven Medium. Im Absorber des elektromagnetischen Kalorimeters werden von den Elektronen und Photonen durch Paarproduktion und Bremsstrahlung Schauer aus Elektronen und Positronen erzeugt. Das aktive Medium wird von den eintreffenden Elektronen und Positronen ionisiert und die erzeugten Ionen verursachen an Elektroden einen Ladungsfluss. Der gesamte Ladungsfluss ist proportional zur Energie des primären Teilchens. Bei hadronischen Schauern wechselwirken die Teilchen mit den Materiekernen und verlieren ihre Energie durch inter- und intranukleare Kaskadenprozesse.

¹⁰ Semi-Conductor-Tracker

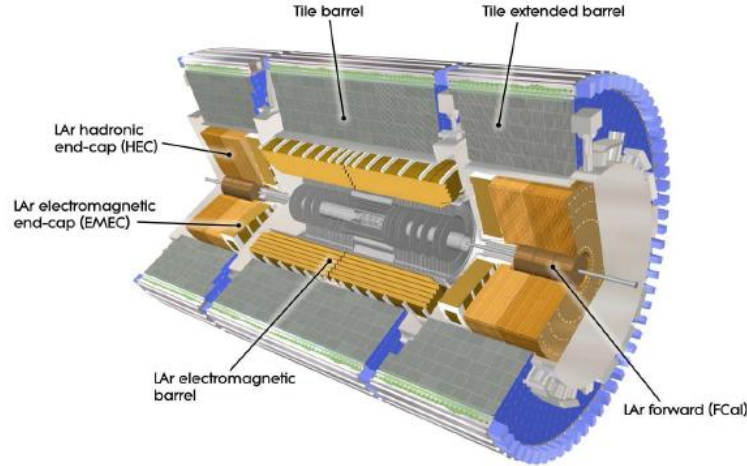


Abbildung 1.2: Aufbau der Kalorimeter [1]

Das elektromagnetische Kalorimeter ist so konstruiert, dass Elektronen und Photonen darin fast ihre gesamte Energie (mehr als 95%) durch Paarproduktion und Bremsstrahlung verlieren. Auch Hadronen deponieren Energie in Form eines Schauers im EM-Kalorimeter. Da hadronische Schauer jedoch eine sehr viel größere Eindringtiefe haben als elektromagnetische Schauer, schließt sich an das EM-Kalorimeter das hadronische Kalorimeter an. Um sämtliche Schauer zu enthalten, hat das elektromagnetische Kalorimeter eine Dicke von etwa 22 Strahlungslängen X_0 ¹¹ im Zentralbereich und 24 X_0 im Endkappen-Bereich. Das hadronische Kalorimeter hat eine Dicke von 9,7 Wechselwirkungslängen λ ¹² im Zentralbereich und 10 λ in den Endkappen, so dass sich eine insgesamte Kalorimeterdicke von 11 Wechselwirkungslängen (bei $\eta = 0$) ergibt. Dies ist ausreichend, damit mehr als 95% der Teilchen des hadronischen Schauers, dessen longitudinale Länge zwischen 6 und 9 λ liegt, ihre gesamte Energie im Kalorimeter deponieren. Zusammen mit dem großen η -Bereich, den die Kalorimeter abdecken garantiert dies eine gute Messung der fehlenden transversalen Energie E_T^{miss} , was in vielen Physikprozessen von großer Bedeutung ist.[1]

Das EM-Kalorimeter ist ein Sampling-Kalorimeter aus Blei und flüssigem Argon (LAr) in Ziehharmonika-Struktur, um eine ϕ -Symmetrie ohne Zwischenräume oder Spalten, in denen keine Energie gemessen werden kann, zu erzeugen. Im Kalorimeter unterscheidet man zwischen dem Zentralbereich ($|\eta| < 1,475$) und zwei Endkappen-Bereichen ($1,375 < |\eta| < 3,2$). Der Zentralbereich ist noch einmal unterteilt in zwei identische Halbzylinder, die beiden Endkappen sind zwei koaxiale Räder im Bereich $1,375 < |\eta| < 2,5$ und $2,5 < |\eta| < 3,2$. Die Energieauflösung beträgt

$$\frac{\sigma_E}{E} = \frac{10\%}{\sqrt{E}} + 0,7\% \quad (1.2)$$

Das hadronische Kalorimeter umschließt das elektromagnetische Kalorimeter. Es werden drei Bereiche unterschieden:

- Das Tile-Kalorimeter befindet sich direkt hinter dem EM-Kalorimeter und besteht

¹¹9 Als Strahlungslänge wird die Strecke bezeichnet, nach der die Energie eines Elektronenstrahls auf 1/e abgefallen ist.

¹²Als Wechselwirkungslänge wird die Strecke bezeichnet, nach der die Intensität eines Teilchenstrahls, aufgrund von hadronischen Reaktionen, auf 1/e abgefallen ist.

aus einem Zentralbereich mit $|\eta| < 1,0$ und zwei erweiterten zentralen Bereichen mit je $0,8 < |\eta| < 1,7$. Im Gegensatz zum elektromagnetischen LAr Kalorimeter wurde hier ein Samplingkalorimeter mit Stahlabsorber und szintillierenden Kacheln in versetzter Anordnung verwendet. In radialer Richtung ist es zwischen $2,28m < R < 4,24m$ in drei Lagen unterteilt, mit Dicken von 1,5, 4,1 und 1,8 λ für den Zentralbereich und 1,5, 2,6 und 3,3 λ für den erweiterten Zentralbereich. Die Energieauflösung ist $\sigma_E/E = 50\%/\sqrt{E} + 3\%$.

- Als hadronischer Endkappen-Bereich (HEC) werde zwei unabhängige Räder auf jeder Seite bezeichnet, die direkt hinter den EM-Endkappen angeordnet sind. Auch hier wird flüssiges Argon als aktives Material verwendet, die Absorberplatten bestehen jedoch aus Kupfer. Das HEC deckt den Bereich von $1,5 < |\eta| < 3,2$ ab, wobei es mit dem LAr-Forward-Kalorimeter überlappt und eine Energieauflösung von $\sigma_E/E = 50\%/\sqrt{E} + 8\%$ erreicht.
- Das Vorwärts-Kalorimeter (Forward-Calorimeter, FCal) liegt zwischen HEC und Strahlrohr und dient dazu, Teilchen, die nahezu parallel zu Strahlachse gestreut werden, nachzuweisen. Es befindet sich somit bei $3,1 < |\eta| < 4,9$. Das FCal ist ungefähr 10 λ tief und in wiederum drei Module aufgeteilt: Ein Modul mit Kupferabsorbern als elektromagnetische Lage und zwei Module mit Wolfram-Absorbern als hadronische Lagen. Als aktives Medium wird wieder flüssiges Argon verwendet.

Den äußersten Bereich des Detektors bildet das Myonsystem, das zur Impulsbestimmung der in den Kollisionen und Zerfallsprozessen entstehenden Myonen verwendet wird. Diese sind minimalionisierende Teilchen, d.h. sie erfahren beim Durchgang durch Materie nur einen geringen Energieverlust und durchdringen somit leicht den Detektor. Im Myonsystem werden sie durch große, supraleitende Toroidmagneten abgelenkt. Im Zentralbereich von $|\eta| < 1,4$ ist dies ein großer Toroid mit einem integrierten Magnetfeld von 1,5 bis 5,5 Tm[1], bei $1,6 < |\eta| < 2,7$ werden die Myonenspuren durch zwei kleinere Endkappen-Magneten (1 bis 7,5 Tm[1]) gekrümmt. In der Übergangsregion von $1,4 < |\eta| < 1,6$ wird die Ablenkung durch eine Kombination von Zentralbereich- und Endkappen-Magneten gewährleistet. Zum Nachweis und zur Spurrekonstruktion befinden sich im nahezu gesamten η -Bereich Driftröhren (MDT). Bei großem η ($2 < |\eta| < 2,7$) verwendet man Kathoden-Streifen-Kammern (CSC) mit einer höheren Granularität.[1]

1.3 Der Level 1 Kalorimeter Trigger

Bei einer angestrebten Luminosität von etwa $10^{34} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$ kollidieren die Strahlbündel im LHC in einem zeitlichen Abstand von 25ns, mit jeweils etwa 23 inelastischen Stößen pro Bunchcrossing (Kollision zweier Strahlbündel). Diese enorme Rate von Proton-Proton-Wechselwirkungen und die nur sehr begrenzte Bandbreite der Auslese erfordern eine Echtzeit-Datenselektion, die relevante Prozesse vom Untergrund unterscheiden und somit die Datenmenge reduzieren kann. Solche Systeme werden Trigger genannt. Der ATLAS-Detektor besitzt drei Triggerstufen, die schematisch in Abb. 1.3 dargestellt sind. Die erste Selektion wird vom Level 1-Trigger vorgenommen, einem Hardwaretrigger, der die Datenmenge von der Strahlkollisions-Rate von 40,08 MHz auf maximal 75kHz reduziert. Der Entscheidungsprozess geschieht dabei innerhalb einer Latenzzeit von 2,5 μ s. Der Level 2-Trigger ist ein Software-Trigger, der ein Computer-Netzwerk mit hoher Kapazität verwendet, um aus den kompletten Detektorinformationen eine Auslese über die von L1

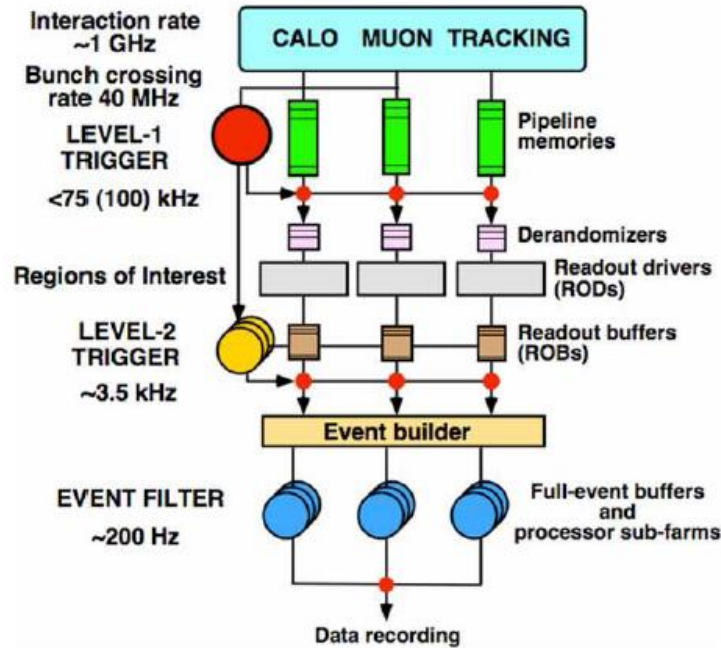


Abbildung 1.3: Blockdiagramm des ATLAS Triggersystems [2]

akzeptierten Ereignisse zu treffen. Er reduziert die Datenmenge weiter auf 3,5kHz in einer Zeit von 40ms. Die dritte Triggerstufe ist der Event-Filter. Er ist, wie L2, ein Software-Trigger, der auf einer Computerfarm und Netzwerk-Hardware basiert. Durch eine offline-Rekonstruktionssoftware wird die Datenrate hier auf 200Hz reduziert. Bei dieser Frequenz ist ein Speichern der Daten für weitere Analysen möglich.

Der Level 1 Trigger sucht nach Signaturen von Elektronen, Myonen und Jets mit hohem transversalem Impuls. Er setzt sich aus zwei Komponenten zusammen, die in Abbildung 1.4 schematisch zu sehen sind. Der Myon-Trigger sucht nach Spuren im Myonsystem, die auf einen hohen Transversalimpuls p_T des Teilchens schließen lassen und vom Wechselwirkungspunkt ausgehen. Die dafür verwendeten Trigger-Kammern sind RPCs (Resistive Plate Chamber) und TGCs (Thin Gap Chamber) die sich im Zentral- bzw. Endkappen-Bereich befinden.

Der Kalorimeter-Trigger (Abb. 1.5) trifft seine Auswahlentscheidung aufgrund von Informationen aus dem gesamten elektromagnetischen und hadronischen Kalorimeter. Da dies schnell in einem festgelegten Zeitraum von maximal $2,5\mu s$ geschehen muss, verwendet der Trigger Daten mit einer reduzierten Granularität, indem mehrere Kalorimeterzellen zu sogenannten Triggertowern von $0,1 \times 0,1$ in $\Delta\eta \times \Delta\Phi$ im Zentralbereich (insgesamt ca. 7200) zusammengefasst werden. Die aus den Triggertowern ausgelesenen Signale werden an das PreProzessorsystem weitergeleitet. Dessen Aufgabe ist die Digitalisierung der analogen Signale aus dem Kalorimeter, die Bestimmung des Zeitpunktes der Strahlkreuzung, in der die Wechselwirkung stattgefunden hat, und die Kalibration der Messung der transversalen Energie E_T . Die Datenprozessierungselektronik, der sogenannte PreProzessor, besteht aus 8 Elektroniktürmen, die als Crates bezeichnet werden und sich außerhalb des Detektors befinden. 6 der Crates enthalten je 16 PreProzessorModule (PPM), die übrigen 2 jeweils nur 14. Jedes PPM bearbeitet 64 Triggertower. Die Signale werden an eines von 4 analo-

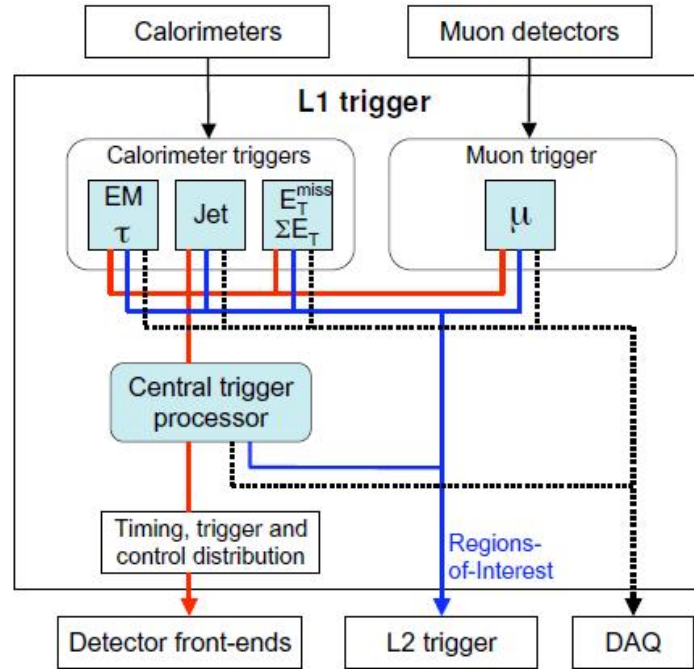


Abbildung 1.4: Schema des Level1-Triggers [2]

gen Input-Boards (AnIn-Board) weitergegeben, wo sie verstärkt werden. Um das Signal in einen meßbaren Bereich anzuheben, wird von einem DAC ein Spannungs-Offset (Pedestal) hinzuaddiert. Verstärkung und Pedestal sind so gewählt, dass bei der Digitalisierung der Analogue-to-Digital-Converter (ADC) bei einem entsprechenden Signal von etwa 250 GeV in Sättigung übergeht. Die aufbereiteten Pulse werden an eines von 4 MultiChipModulen (MCM) weitergeleitet (16 MCM pro PPM). Jedes MCM hat 4 Flash-ADCs (FADC), die je ein Signal in einen 10bit Wert umwandeln, in Schritten von 0 bis 1023 ADC-Werte mit einer Digitalisierungsrate von 1 pro 25 ns, und an einen ASIC-Chip geben. Der Chip bestimmt aufgrund des höchsten ADC-Wertes, also des Puls-Maximums, den Zeitpunkt der Strahlkreuzung und kalibriert den E_T -Wert entsprechend einer sogenannten Look-up-Table. Die Informationen werden dann getrennt an zwei verschiedene Prozessoren weitergeleitet. Die transversalen Energiewerte der einzelnen Triggertower werden an den ClusterProzessor geleitet, der die Dichte-Energie-Depositionen von Elektronen und Photonen, die als Cluster bezeichnet werden, identifiziert und lokale Maxima im Kalorimeter sucht, deren Energie und Position er als Regions of Interest (RoI) an den Level 2 Trigger weitergibt. Die Anzahl der gefundenen Cluster wird an den zentralen Level 1-Triggerprozessor übertragen. Die Summe aus je 2×2 Triggertower-Signalen wird dem JetEnergyProcessor (JEP) übergeben, der Jets sucht und die Werte $\sum E_T$ und E_T^{miss} berechnet. Auch der JEP gibt Maxima von Energiedepositionen als ROIs weiter. Die Energie-Summen und Anzahl gefundener Jets werden an den Zentral-Trigger-Prozessor übergeben, der nach einem eingestellten Triggermenü aufgrund der Informationen aus JEP und CP ein Ereignis akzeptiert oder verwirft.[2]

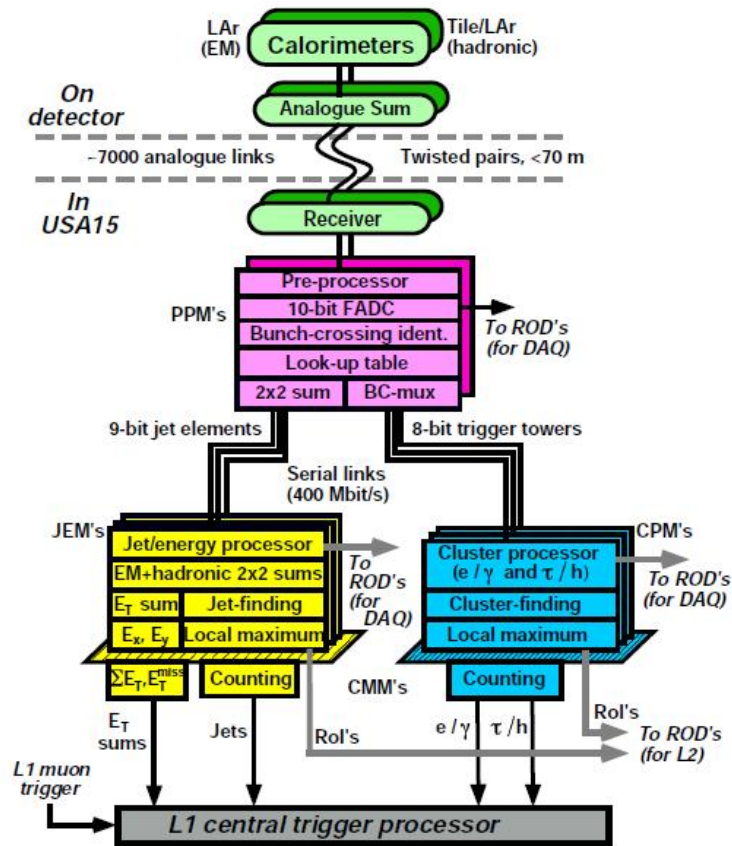
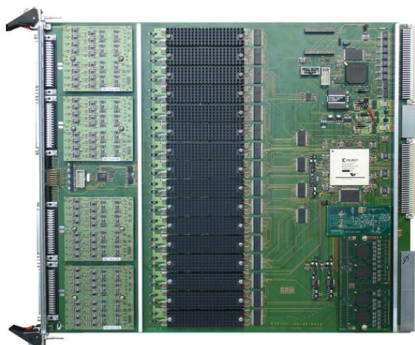
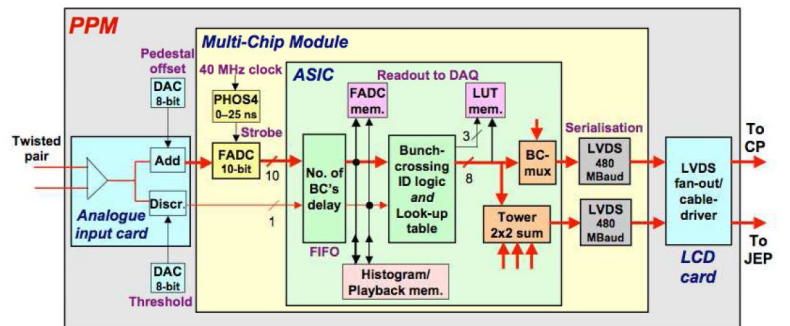


Abbildung 1.5: Der L1-Kalorimeter-Trigger [2]



Fotografie [3]



Signalkette für einen einzelnen Kanal [2]

Abbildung 1.6: Das PreProcessor-Modul

Kapitel 2

Analyse

Im folgenden Teil wird die Untersuchung der Stabilität der Pedestalwerte der PPMs vorgestellt.

2.1 Motivation

Im Februar 2010 wurden unerwartete Veränderungen in den Level1-Trigger Raten¹ festgestellt. Die als Run bezeichnete Datennahmeperiode, die dabei besonders auffiel, war Run 147787 vom 18.02.2010. Die Vermutung war, dass die Ursache hierfür in einer Verschiebung des Pedestals liegen könnte. Dadurch würden zu verschiedenen Zeitpunkten unterschiedliche Energien benötigt, um die Triggerschwelle zu überschreiten, und somit würde sich die Anzahl der Ereignisse, die vom Trigger akzeptiert werden, ändern. Die folgende Studie wurde durchgeführt, um das Verhalten des Pedestals genauer zu charakterisieren. Dafür wurden zunächst mehrere Datensätze der besagten Woche auf kurzzeitige und langfristige Variationen des Pedestals sowie Unterschiede zwischen den Runs untersucht. Nachdem ähnliche Ratenänderungen ebenfalls im Mai festgestellt wurden, wurde die Analyse auf Runs dieses Zeitraumes erweitert.

2.2 Pedestals

Wie bereits im vorherigen Kapitel erwähnt wird vor der Digitalisierung der analogen Kalorimeterpulse ein Spannungs-Offset zum Signal hinzuaddiert, welcher Pedestal genannt wird. Dieser ist notwendig, um das Signal in einen meßbaren Bereich anzuheben. Der FADC wandelt die elektrischen Pulse, die zwischen 0 und 2,5 V haben in ADC-Werte von 0 bis 1023 um, wobei 1023 Counts einer Energie von etwa 250 GeV entsprechen. Der Pedestal kann von außen über einen Digital-zu-Analog-Konvertierer (DAC) für jeden Triggertower vorgegeben werden. Er wurde auf 32 ADC-Einheiten festgelegt.

2.3 Datensätze

Zur Untersuchung des Pedestals wurden Daten im nTuple-Format des Cosmic-Streams verwendet. Das ist ein Datensatz, der dadurch zustande kommt, dass in den derzeitigen Runperioden nicht alle im LHC möglichen Strahlbündel gefüllt sind. Bei einer Kollision von zwei leeren Strahlbündeln kommt es daher zu keinerlei Wechselwirkung. Sämtliche Hits im Detektor stammen dann von Teilchen aus der kosmischen Höhenstrahlung, die als Untergrund in solchen Messungen bestimmt werden können und im Cosmic-Stream gespeichert werden. Allerdings treffen diese Teilchen deutlich seltener auf den Detektor. Daher sind diese Daten mit wenigen Pulsen besonders gut geeignet für Untersuchungen des Pedestals. Aus den nTuplen wurden folgende Variablen der einzelnen Kanäle für die Analyse verwendet, wobei jeweils zwischen den Werten der hadronischen und der elektromagnetischen Kalorimeterlage unterschieden werden muss:

- Die Werte η und ϕ geben die Position des Triggertowers im Detektor wieder. Sie sind für alle Ereignisse in einem Triggertower gleich und müssen daher nur einmal ausgelesen werden.
- Die CoolID ist eine eindeutige, 8 stellige hexadezimale Zahl für jeden Kanal (vgl. Anhang).

¹Anzahl getriggelter Ereignisse pro Zeit

- Der Zeitstempel oder Timestamp ist der Zeitpunkt, zu dem das Ereignis stattgefunden hat. Er wird in Sekunden angegeben, gezählt vom 01.01.1970.
- Die ADC-Werte sind die Anzahl von ADC-Counts, die in einer Strahlkreuzung gemessen werden. Sie sind ganzzahlig und schwanken, bei nicht vorhandenem Signal, um den Pedestal. Ein Signal kann dabei mehrere Bins von 25ns, also Bunchcrossings, lang sein. Es gibt je nach Datennahme-Modus Auslesen von 5, 7 und 15 Bins.

Insgesamt wurden zwei Runsequenzen betrachtet: 9 Runs vom 15.02.2010 bis zum 21.02.2010 und 3 Runs vom 05.05.2010 bis 06.05.2010. Die wichtigsten Rundaten sind in Tabelle 1 aufgeführt. Aus den Raten werden später besondere Mittele errechnet (vgl. 2.5.2).

Run	Startzeitpunkt	Endzeitpunkt	CosmicsCalo Rate
147334	Mon, Feb 15 2010, 18:22:29	Mon, Feb 15 2010, 22:31:20	3,478Hz
147470	Tue, Feb 16 2010, 21:03:53	Wed, Feb 17 2010, 08:00:16	3,038Hz
147610	Wed, Feb 17 2010, 19:07:20	Thu, Feb 18 2010, 01:12:55	3,042 Hz
147787	Thu, Feb 18 2010, 22:20:23	Fri, Feb 19 2010, 03:26:30	11,589 Hz
147931	Fri, Feb 19 2010, 18:22:28	Sat, Feb 20 2010, 00:53:17	5,334 Hz
147932	Sat, Feb 20 2010, 01:00:49	Sat, Feb 20 2010, 08:02:42	3,873 Hz
148019	Sat, Feb 20 2010, 11:56:41	Sat, Feb 20 2010, 16:14:43	4,112 Hz
148072	Sat, Feb 20 2010, 18:26:32	Sun, Feb 21 2010, 08:04:06	3,661 Hz
148156	Sun, Feb 21 2010, 11:28:47	Sun, Feb 21 2010, 16:03:56	3,505 Hz
154725	Wed, May 05 2010, 18:02:30	Thu, May 06 2010, 04:29:35	4,556 Hz
154755	Thu, May 06 2010, 07:07:14	Thu, May 06 2010, 12:17:16	5,857 Hz
154788	Thu, May 06 2010, 19:11:06	Fri, May 07 2010, 11:54:27	6,132 Hz

Tabelle 2.1: Rundaten der verwendeten Datensätze

2.4 Pedestalberechnung und Datenauswahl

2.4.1 Berechnung der Pedestals aus den ADC-Werten

Der Pedestal wird also Spannung so eingestellt, dass er als digitaler 8bit-Wert an einem Digital-to-Analogue-Converter auf dem PPM einen Wert von etwa 32 hat. Dann wird er vom analogen Input-Board zum ankommenden Signal hinzuaddiert. Um den wahren Pedestal zu bestimmen, betrachten wir das Ausgangssignal des FADC. Der FADC digitalisiert kontinuierlich mit einer Rate von 40MHz. Über den Auslesemodus kann die Anzahl der auszulesenden Werte (Bins) eingestellt werden. Wenn kein Signal anliegt, so liegen diese Werte um den Pedestalwert herum. Für den Mittelwert des Pedestals werden die Bin-Werte eines Ereignisses aufsummiert und durch die Anzahl der ausgelesenen Werte geteilt. Hierbei wird zwischen hadronischer und elektromagnetischer Lage unterschieden, da der Level 1-Trigger Informationen sowohl aus dem elektromagnetischen als auch aus dem hadronischen Kalorimeter verwendet. Es wird für jeden Kanal separat der Pedestal bestimmt. Die Triggertower beider Lagen sind über die CoolID eindeutig je einem Kanal/FADC auf den PPMs zugeordnet.

2.4.2 Ereignis-Selektion

Obwohl die kosmische Strahlung vergleichsweise nur wenige Signale im Kalorimeter hinterlässt, gibt es doch Kanäle, die ein Signal empfangen. Diese sind für die Pedestal-Analyse ungeeignet und werden daher verworfen. Dies geschieht durch einen Schnitt auf Kanäle, bei denen einer der ausgelesenen ADC-Werten größer als 40 ist. Bei einem solchen Ereignis wird nur der Kanal mit dem Signal verworfen, die restlichen Kanäle, in denen die ADC-Werte unter 40 lagen, werden verwendet. In den Mittelwertberechnungen wird der Kanal für dieses Ereignis übersprungen.

2.5 Datenanalyse

Die Analyse besteht aus 3 Teilen: einem Vergleich des mittleren Pedestals von zwei Runs, einer Studie der kurzzeitigen Pedestalvariationen über einen Run und einer Studie der Langzeit-Pedestalvariationen über mehrere Runs.

2.5.1 Mittelwerte und Differenzen zwischen Runs

Um den gemittelten Pedestal zweier Runs vergleichen zu können, werden für jeden Triggertower die Pedestals aller Ereignisse aufsummiert und durch die Anzahl der Ereignisse geteilt. Dies geschieht iterativ entsprechend der Formel:

$$\bar{x}_{i+1} = \frac{\bar{x}_i \cdot n_i + x_{i+1}}{n_{i+1}} \quad (2.1)$$

Hierbei ist \bar{x}_i der vorherige Mittelwert, x_{i+1} der Pedestalwert des derzeitigen Ereignisses und n_i die Anzahl der Ereignisse, die in \bar{x}_i eingeflossen sind. Der Fehler auf den Mittelwert wird berechnet durch die Standardabweichung

$$\Delta\bar{x} = \sqrt{\frac{\sum (\bar{x} - x_i)^2}{n \cdot (n - 1)}} = \sqrt{\frac{n \cdot \bar{x}^2 - 2 \cdot \bar{x} \cdot \sum x_i + \sum x_i^2}{n \cdot (n - 1)}} \quad (2.2)$$

wobei $\sum x_i$ und $\sum x_i^2$ iterativ berechnet werden. Der Fehler wird am Ende über den Wert \bar{x} für jeden Kanal bestimmt. Die einzelnen Pedestal-Mittelwerte der Triggertower werden in eine $\eta - \phi$ -Mappe des Kalorimeters eingetragen, um die Pedestals der gesamten Detektorgeometrie vergleichen zu können. Hierbei ist auf der x - und y -Achse die η - bzw. ϕ -Position des Kanals aufgetragen, die Farbe entspricht gemäß der nebenstehenden Skala dem für den Triggertower errechneten gemittelten Pedestal in ADC-Werten. Kanäle, deren Pedestal-Werte außerhalb der angezeigten Skala liegen, werden weiß angezeigt.

In Abb. 2.1 ist eine solche Mappe für die hadronische (1.2 (a)) und für die elektromagnetische (1.2 (b)) Lage von Run 147787 gezeigt. Der Pedestal liegt wie zu erwarten in den meisten Fällen statistisch verteilt zwischen 31 und 33. Allerdings gibt es auch einige Kanäle, die höhere oder niedrigere Werte aufweisen. Der Pedestal ist für verschiedene Triggertower unterschiedlich, was daran liegt, dass diese ein unterschiedliches Antwortverhalten aufweisen und daher der Pedestal für jeden Kanal individuell eingestellt wird.

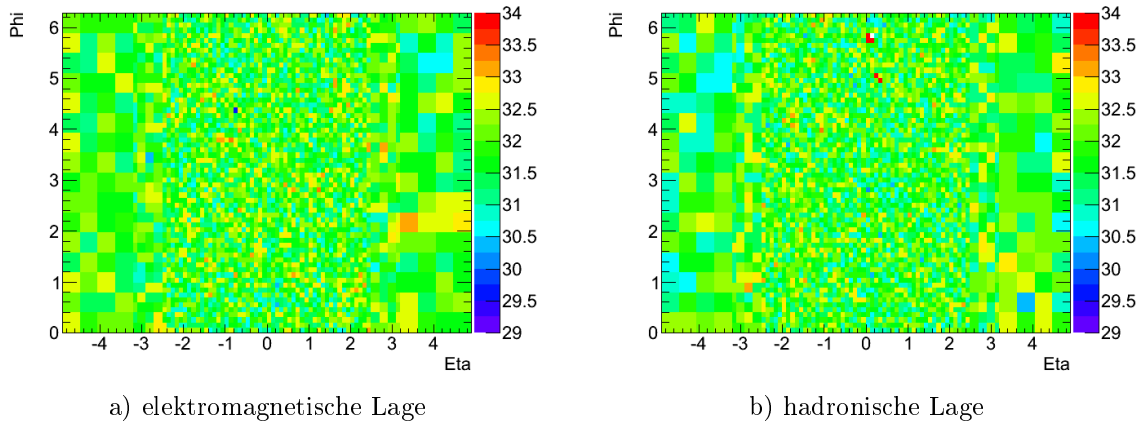


Abbildung 2.1: $\eta - \phi$ -Mappen des mittleren Pedestals von Run 147787 für elektromagnetische und hadronische Lage

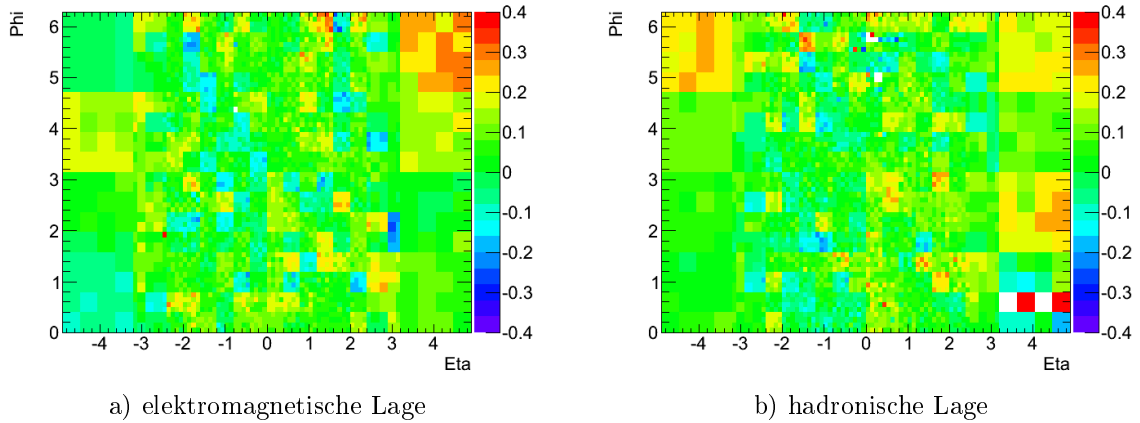


Abbildung 2.2: $\eta - \phi$ -Mappen der Differenz der mittleren Pedestals von Run 147610 und Run 147787 für die elektromagnetische und hadronische Lage

Um mögliche Veränderungen zwischen den Runs erkennen zu können werden die $\eta - \phi$ -Mappen der Mittelwerte von zwei Runs voneinander abgezogen. Effektiv bedeutet das, dass die Differenz der Mittelwerte jedes Triggertowers gebildet und in eine weitere $\eta - \phi$ -Mappe eingetragen wird. Dadurch wird ein Ansteigen oder Abfallen von einem Run zum anderen durch eine von Null verschiedene Differenz sichtbar. Diese $\eta - \phi$ -Mappen werden für aufeinander folgende Runs gebildet.

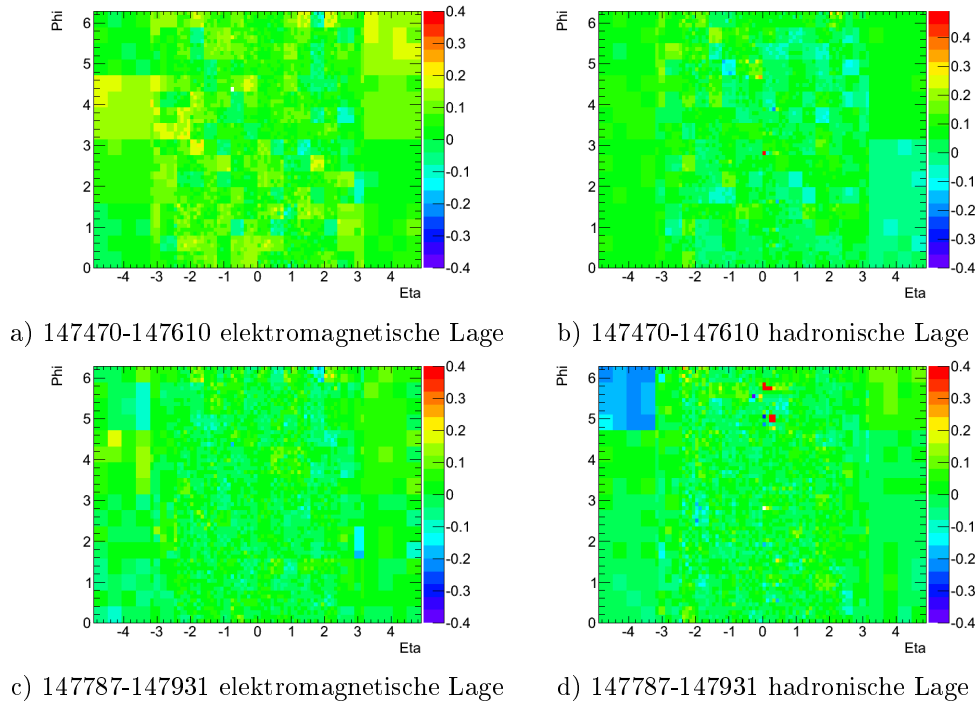
In Abb. 2.2 sind die $\eta - \phi$ -Mappen für die Differenz zwischen Run 147610 und Run 147787 für elektromagnetische und hadronische Lage gezeigt.

Obwohl der größte Bereich grün ist, d.h. der Unterschied des mittleren Pedestals zwischen den beiden Runs ist geringer als 0,1 ADC-Werte, gibt es Regionen, in denen der Pedestal gesunken bzw. gestiegen ist. Auffällig ist hierbei die Struktur aus jeweils 4×4 -Triggertowern. Diese 16 Tower sind jeweils einem AnIn-Board zugeordnet (vgl. Anhang), was bedeutet, dass sich die Pedestalschwankungen in der Elektronik-Struktur des Triggers wiederfinden lassen. Zudem lässt sich feststellen, dass innerhalb eines PPMs die 16 Kanäle der 4 AnIn-Boards in jeweils unterschiedliche Richtungen driften². In einigen wenigen Kanälen ist der Pedestal stark gesunken³. Diese Kanäle sind auch in Abb. 2.1 erkennbar und daher möglicherweise defekt.

Um zu vergleichen, ob sich der Drift über mehrere Runs hinweg fortsetzt, betrachten wir die Differenzen zwischen den zwei Runs vor Run 147787 und dem darauffolgenden Run 147931 (Abb. 2.3). Zwischen Run 147470 und Run 147610 lässt sich sowohl der Drift als auch die AnIn-Board-Struktur erkennen, wenn auch wesentlich schwächer als zwischen Run 147610 und 147787. Vor allem in der elektromagnetischen Lage (9b) werden Variationen bis zu 0,25 ADC-Werten erkennbar. Die stark schwankenden Kanäle, die schon Abb. 2.2 zeigt, sind auch hier wieder sichtbar.

²Die zu einem PPM gehörenden AnIn-boards sind 4 der 4×4 Towerstrukturen, die innerhalb eines η -Wertes von oben nach unten in einer Reihe liegen (vgl. Skizze Anhang).

³Da Run 147787 von 147610 abgezogen wurde, bedeuten positive Differenzen ein zeitliches Absinken des Pedestals.

Abbildung 2.3: $\eta - \phi$ -Mappen der Differenz der mittleren Pedestals, Februar-Runs

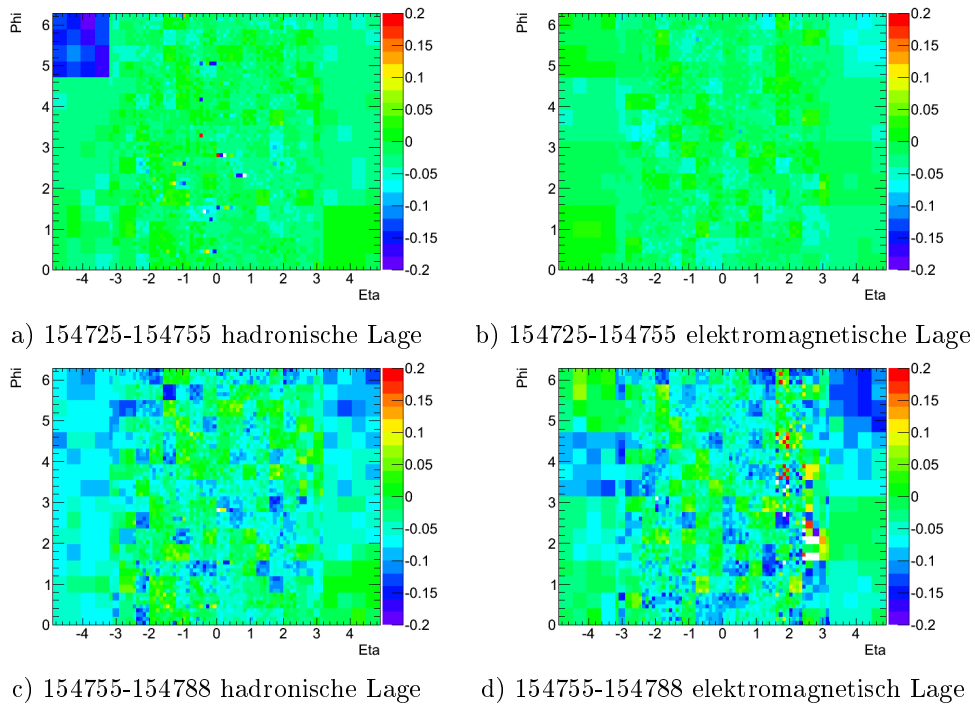
Der weitere Verlauf des Pedestals ist im Mittel relativ konstant, die Diagramme der Differenzen dieser Runs sind im Anhang aufgeführt. Über die gesamte Detektorgeometrie liegt der Unterschied zwischen zwei aufeinanderfolgenden Runs unter 0,1 ADC-Werten. In den vorhergehenden Runs 147334 und 147470 lassen sich jedoch in einzelnen Kanälen starke Abfälle feststellen. Da diese jedoch nicht strukturell und nur einmalig erscheinen, sind sie für den weiteren Verlauf der Analyse nicht weiter von Bedeutung.

Nachdem sich in Run 147787 eine deutliche Veränderung des Pedestals feststellen ließ, wurden auch Runs vom Mai 2010 analysiert. In Abb. 2.4 sind die Differenzen zwischen Run 154725 und 154755 ((a) und (b)) und zwischen Run 154755 und 154788 ((c) und (d)) aufgetragen. Zu beachten ist hierbei, dass die Skala der z-Achse um den Faktor 1/2 kleiner ist als bei den Runs vom Februar. Zwischen den letzten beiden Runs tritt eine Schwankung des Pedestals um 0,1 bis 0,2 ADC-Counts auf, diesmal fast ausschließlich ansteigend. Die Variationen zeigen wieder die 4×4 -Blockstruktur der AnIn-Boards. In der elektromagnetischen Lage finden sich zusätzlich einige stark schwankende Kanäle zwischen $1,5 < \eta < 2,5$. Zwischen den ersten beiden Runs treten ebenfalls Anstiege des Pedestals mit dem selben Muster auf, allerdings deutlich kleiner.

Um Aussagen über die Abweichungen der einzelnen Pedestalwerte vom Mittelwert in einem Run treffen zu können, wurden RMS-Plots erstellt, in denen der RMS-Wert als

$$\Delta \bar{x}_{RMS} = \sqrt{\frac{\sum (\bar{x} - x_i)^2}{n}} \quad (2.3)$$

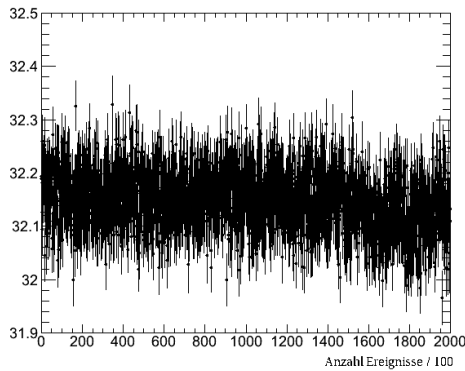
in eine $\eta - \phi$ -Mappe gefüllt wurde. Diese Diagramme sind ebenfalls im Anhang verzeichnet.

Abbildung 2.4: $\eta - \phi$ -Mappen der Differenz der mittleren Pedestals, Mai-Runs

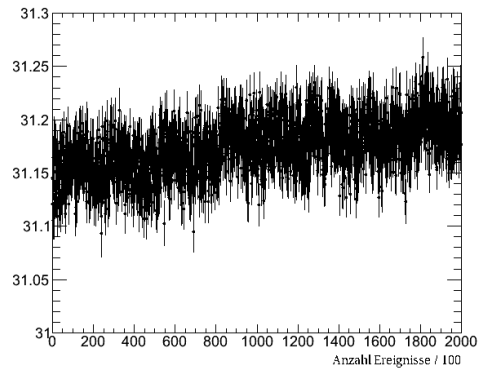
Der RMS liegt in den meisten Fällen zwischen 0 und 1 ADC-Wert. In der hadronischen Lage weichen bei kleinen Werten für η die einzelnen Pedestalwerte etwas mehr vom Mittelwert ab, als bei großem η , was sich an dem höheren RMS-Wert zeigt. Für die elektromagnetische Lage ist der RMS relativ konstant über die gesamte Detektorgeometrie. Im Allgemeinen sind die RMS-Werte nicht groß, es gibt also keine starken Abweichungen vom mittleren Pedestal innerhalb des Runs. Die Mittelung ist daher gerechtfertigt.

2.5.2 Kurzzeitige Variationen des Pedestals

Da es offensichtlich Veränderungen des Pedestals zwischen Runs gibt, ist es wichtig, genaueren Aufschluss über den Verlauf des Pedestals innerhalb eines Runs zu gewinnen. Aus vorherigen Studien ist bekannt, dass der Kühlkreislauf des PreProzessor-Systems eine Temperatur-Oszillation mit einer Periode von etwa 7 Minuten aufweist. Es wird vermutet, dass diese Schwankungen auch Auswirkungen auf den Pedestal haben. Um dies zu untersuchen werden die Pedestals in zeitlicher Reihenfolge hintereinander aufgetragen. Da statistische Fluktuationen auftreten können, wird der Pedestal über jeweils 100 Events gemittelt, was einem Zeitraum von ungefähr 20 Sekunden entspricht. Der Fehler ergibt sich hierbei wieder gemäß der Standardabweichung aus (2.2). Es werden maximal 200 000 Ereignisse, also 2000 gemittelte Pedestals, verwendet. Auf der x -Achse ist die Anzahl der Ereignisse / 100 aufgetragen, auf der y -Achse der gemittelte Pedestal der dazugehörigen vorangegangenen 100 Ereignisse. In Abb. 2.5 sind zwei solche Verläufe für Run 147787 und Run 154788 - die Runs, zwischen denen sich zuvor die größte Verschiebung beobachten ließ - gezeigt. Beide Runs sind etwas länger als die hier angezeigten 200 000 Ereignisse, der Übersicht halber werden jedoch nur 2000 Einträge gezeigt. Für die Analyse ist dieser Bereich ausreichend.



a) Run 147787 elektromagnetisch



b) Run 154788 hadronisch

Abbildung 2.5: Pedestalverläufe für jeweils einen Kanal innerhalb eines Runs für Februar und Mai

Mithilfe der betrachteten Pedestalverläufe über einen kurzen Zeitraum, bei denen ein Bin ungefähr 20 Sekunden entspricht, lässt sich nicht eindeutig bestätigen, ob sich die Schwankungen des Kühlkreises auf den Pedestal auswirken. Kurze Fluktuationen im Bereich von 20 bis 30 Bins lassen sich vermuten, sind aber nicht eindeutig erkennbar, nicht kontinuierlich und nicht in allen Kanälen zu sehen. Es ist nicht quantifizierbar, ob die Variationen in der Kühlung einen Einfluss auf den Pedestal haben. In Run 154788 lässt sich ein gut sichtbarer, wenn auch geringer Anstieg des Pedestals erkennen. Über den gezeigten Bereich steigt der Pedestal um ca. 0,05 ADC-Werte. Bei Run 147787 ist es nicht möglich, eine quantitative Aussage über den Verlauf des Pedestals zu machen. Um Aufschluss über Anstieg und Abfall des Pedestals innerhalb des Runs zu erlangen wurden die Verläufe innerhalb der verschiedenen Kanäle gefittet. Hierfür wurde ein linearer Fit in Form eines Polynoms ersten Grades

$$f = P_1 = p_1 \cdot x + p_0 \quad (2.4)$$

verwendet. Die in solchen Diagrammen eingezeichneten statistischen Fehler wurden im Fit berücksichtigt und der Fit wurde auf den gesamten Bereich angewandt.

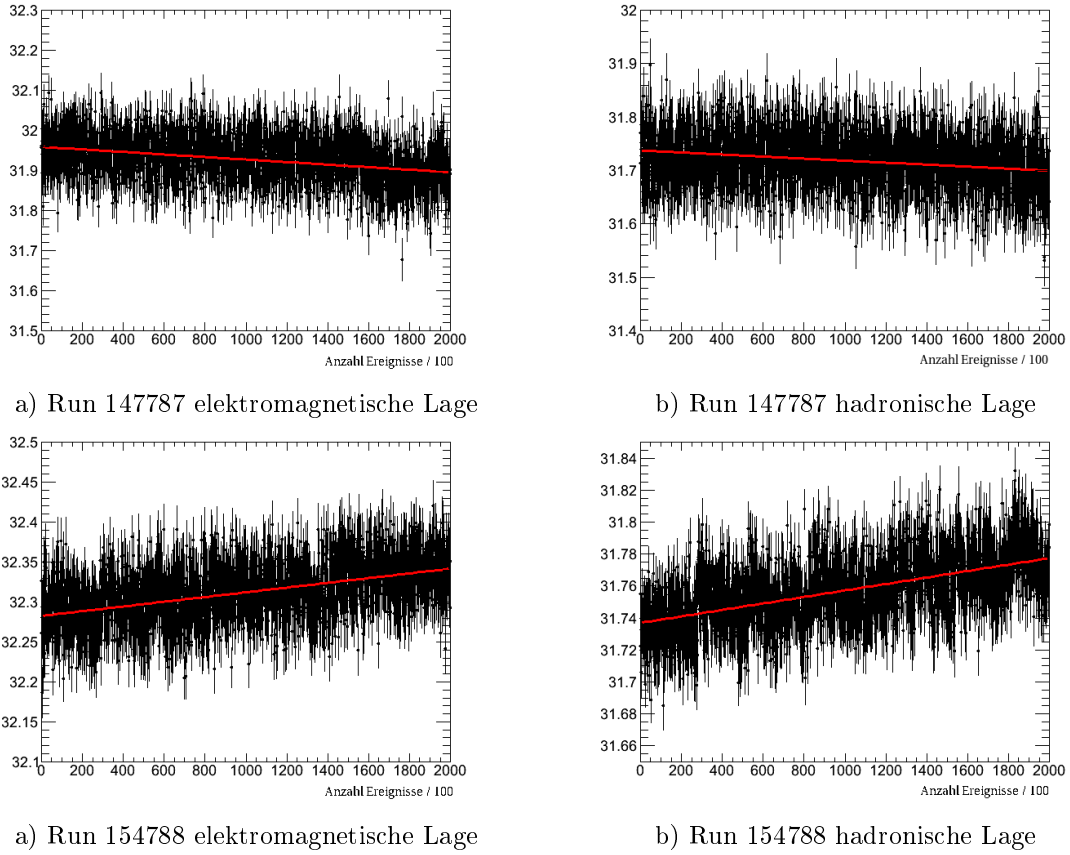


Abbildung 2.6: Gefittete Pedestalverläufe innerhalb eines Runs von Februar und Mai. Zu beachten sind die unterschiedlichen y -Skalen, die gewählt wurden, um den Pedestalverlauf möglichst übersichtlich zu zeigen. Es ist je ein Triggertower gezeigt.

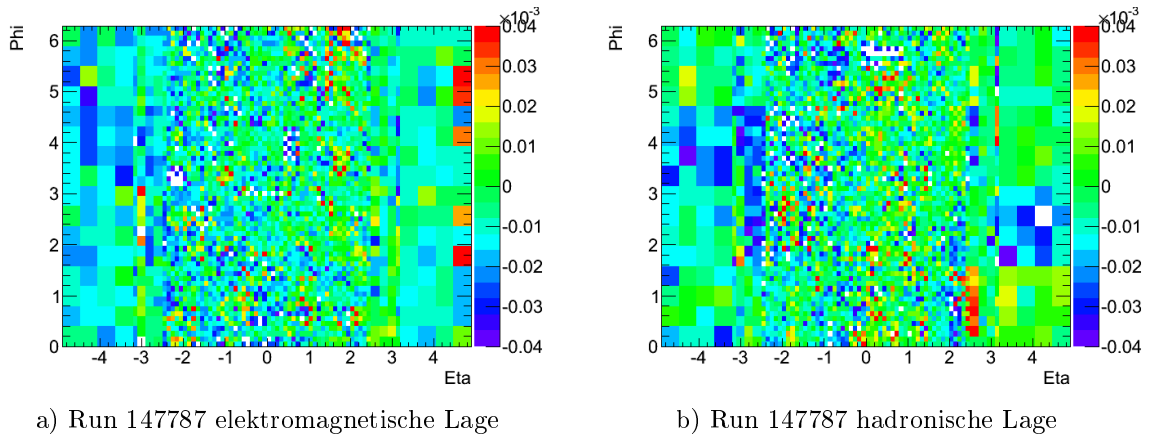


Abbildung 2.7: $\eta - \phi$ -Mappen der gefitteten Steigungen für Run 147787

Beispielhaft sind in Abb. 2.6 für Run 147787 und 154788 jeweils ein Kanal aus elektromagnetischer und hadronischer Lage gezeigt. Die rote Gerade kennzeichnet den Fit. In Run 147787 lässt sich tatsächlich ein zeitlicher Abfall des Pedestals erkennen. Dieser ist gering, über den gesamten Run fällt der Wert um 0,05 ADC-Werte. Dieselbe Differenz in die umgekehrte Richtung weist auch Run 154788 auf. Der Anstieg ist hier jedoch besser

zu erkennen, da die Breite des Pedestalverlaufs schmaler ist.

Um nicht den gefitteten Pedestalverlauf für jeden Kanal einzeln betrachten zu müssen, wurde der Fitparameter p_1 aus dem Analyseprogramm ausgelesen und in eine $\eta - \phi$ -Mappe gefüllt. In Abb. 2.7 sind die Steigungen für die Kanäle der elektromagnetischen und hadronischen Lage von Run 147787 gezeigt. Die beobachteten Steigungen liegen zwischen $\pm 2 \times 10^{-5}$, dies sind jedoch ADC-Werte pro 100 Events, d.h. pro 20 bis 30 Sekunden. Sie sind statistisch verteilt und ohne erkennbare Struktur. Allerdings wird deutlich, dass der Pedestal für die meisten der Kanäle sinkt und nur für vereinzelte steigt, wobei diese positiven Steigungen mit 4×10^{-5} relativ groß sind. Die Steigungsdiagramme der restlichen Februar-Runs sind im Anhang aufgeführt.

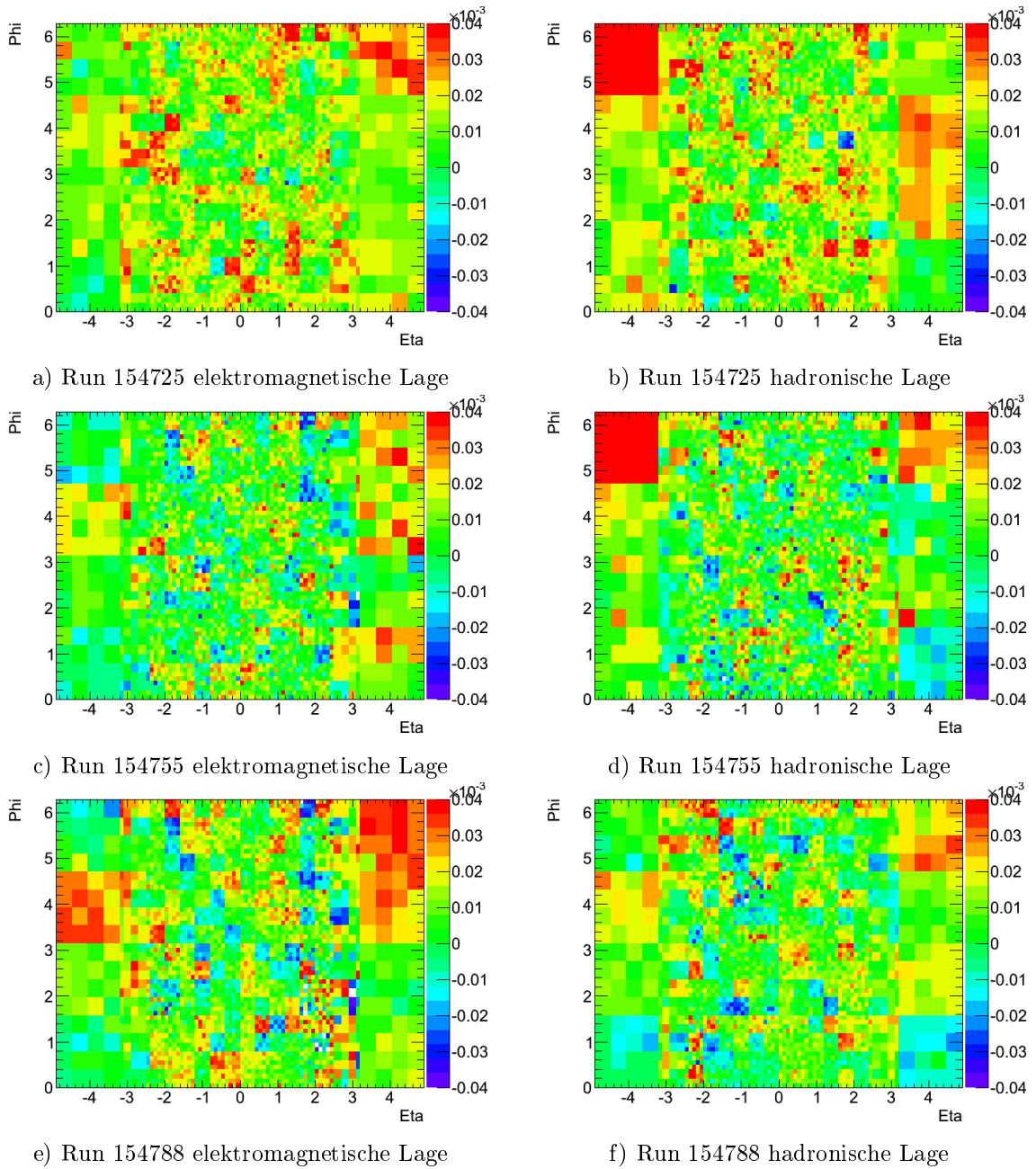


Abbildung 2.8: $\eta - \phi$ -Mappen der gefitteten Steigungen für Mai

Die Steigungen der drei Runs aus dem Mai sind in Abb. 2.8 dargestellt. Hier lässt sich in allen drei Runs sowohl in elektromagnetischer als auch hadronischer Lage wieder die 4×4 -Struktur der AnIn-Boards feststellen. Innerhalb der meisten Boards steigt der Pedestal, allerdings gibt es vor allem in den letzten beiden Runs Strukturen mit negativer Steigung. Im Allgemeinen sind die Steigungen vom Betrag her größer als in Run 147787, auf manchen Boards steigen die Pedestals pro 100 Ereignisse um 4×10^{-5} ADC-Werte.

Die Steigungen des Pedestals der einzelnen Triggertower erscheinen auf den ersten Blick als sehr klein. Betrachtet man jedoch die Auswirkungen auf den gesamten Run, so lässt sich feststellen, dass der Pedestal zwischen Anfang und Ende um bis zu 0,15 ADC-Werte pro Run steigt. Dafür wurde die Anzahl der Ereignisse mit der gefitteten Steigung multipliziert und die so erhaltene Differenz zwischen Anfang und Ende eines Runs in eine $\eta - \phi$ -Mappe gefüllt. Für Run 154788 ist eine solche Anstiegsmappe in elektromagnetischer und hadronischer Lage beispielhaft in Abb. 2.9 gezeigt. Die Diagramme der restlichen Runs von Mai und Februar finden sich im Anhang wieder.

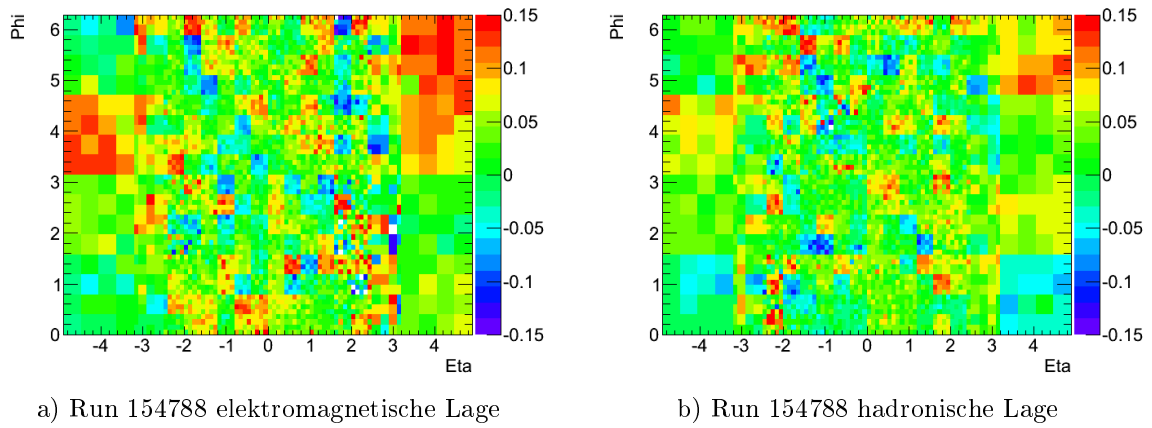


Abbildung 2.9: $\eta - \phi$ -Mappen der Differenz zwischen Anfang und Ende von Run 154788

2.5.3 Langzeitige Variationen des Pedestals

Neben den Pedestalvariationen innerhalb eines Runs ist auch das Verhalten über einen längeren Zeitraum interessant, um zu sehen, ob sich die beobachteten Anstiege und Absenkungen auch über mehrere Runs hinweg fortsetzen. Es wird über einen größeren Zeitraum von etwa 20 Minuten gemittelt, um kurzzeitige Pedestalfluktuationen zu unterdrücken und den statistischen Fehler zu verringern. Die Runs einer Periode weisen ähnliche Cosmic-Raten auf⁴, daher lässt sich aus dem Mittelwert der Raten einer Periode die Anzahl von Ereignissen bestimmen, die ungefähr 20 Minuten entspricht. Der Fehler ergibt sich aus der Standardabweichung der Mittelung. Die errechneten Werte werden in Abhängigkeit der Zeit dargestellt, wobei die Runs anhand der oben angegebenen Start- und Endzeiten unterscheidbar sind. In Abb. 2.10 ist beispielhaft ein Kanal für die Daten vom Februar gezeigt. Die einzelnen Runs sind hier zur besseren Übersicht rot umrandet und beschriftet. Auf der vergrößerten y -Achse ist der Pedestal aufgetragen.

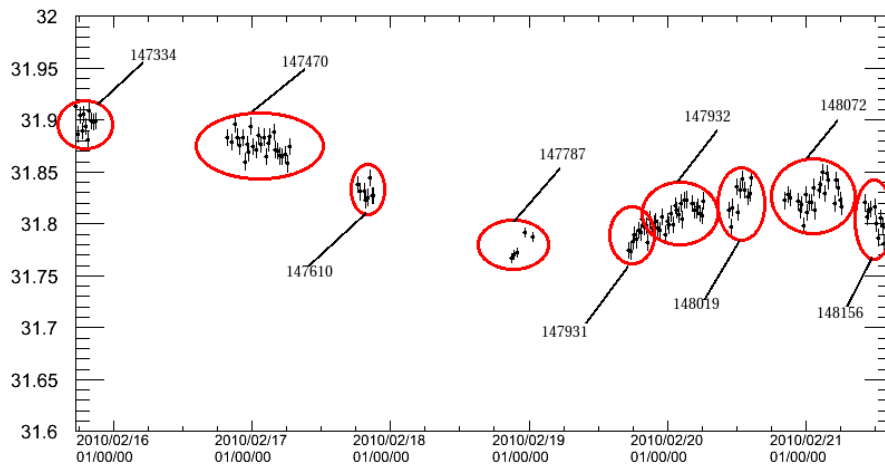


Abbildung 2.10: Beispiel des Pedestalverlaufes eines Triggertowers über mehrere Runs (Februarwoche); einzelne Runs sind rot eingekreist.

Die Pedestalverläufe vom Zeitraum zwischen dem 15.02. und 21.02. sind für 3 Kanäle (von oben nach unten) in jeweils elektromagnetischer und hadronischer Lage in Abbildung 2.11 gezeigt. Diagramme, die den Zeitverlauf über mehrere Runs zeigen, wurden für jeden Triggertower (2×3584) erstellt.

Allgemein lässt sich sagen, dass der Pedestal über den Wochenverlauf keinem eindeutigen Trend folgt. In vielen Kanälen lässt sich, wie in 2.11 (a) und (b), das schon entdeckte Absinken des Pedestals zwischen Run 147610 und 147787 bestätigen. Nach Run 147787 scheint der Pedestal jedoch wieder zu steigen (vgl. Abb. 2.11 (e)). Es gibt jedoch ebenfalls Kanäle, in denen er ansteigt, oder wie in 2.11 (c) und (d), annähernd stabil verläuft. Die Schwankungen liegen im Bereich von 0,1 bis 0,4 ADC-Werten. Um heraus zu finden, ob es sich bei dem Anstieg und Abfall um eine Oszillation handelt, müsste ein längerer Zeitraum betrachtet werden, da die Periode vermutlich mehrere Tage beträgt.

⁴Run 147787 wird getrennt betrachtet

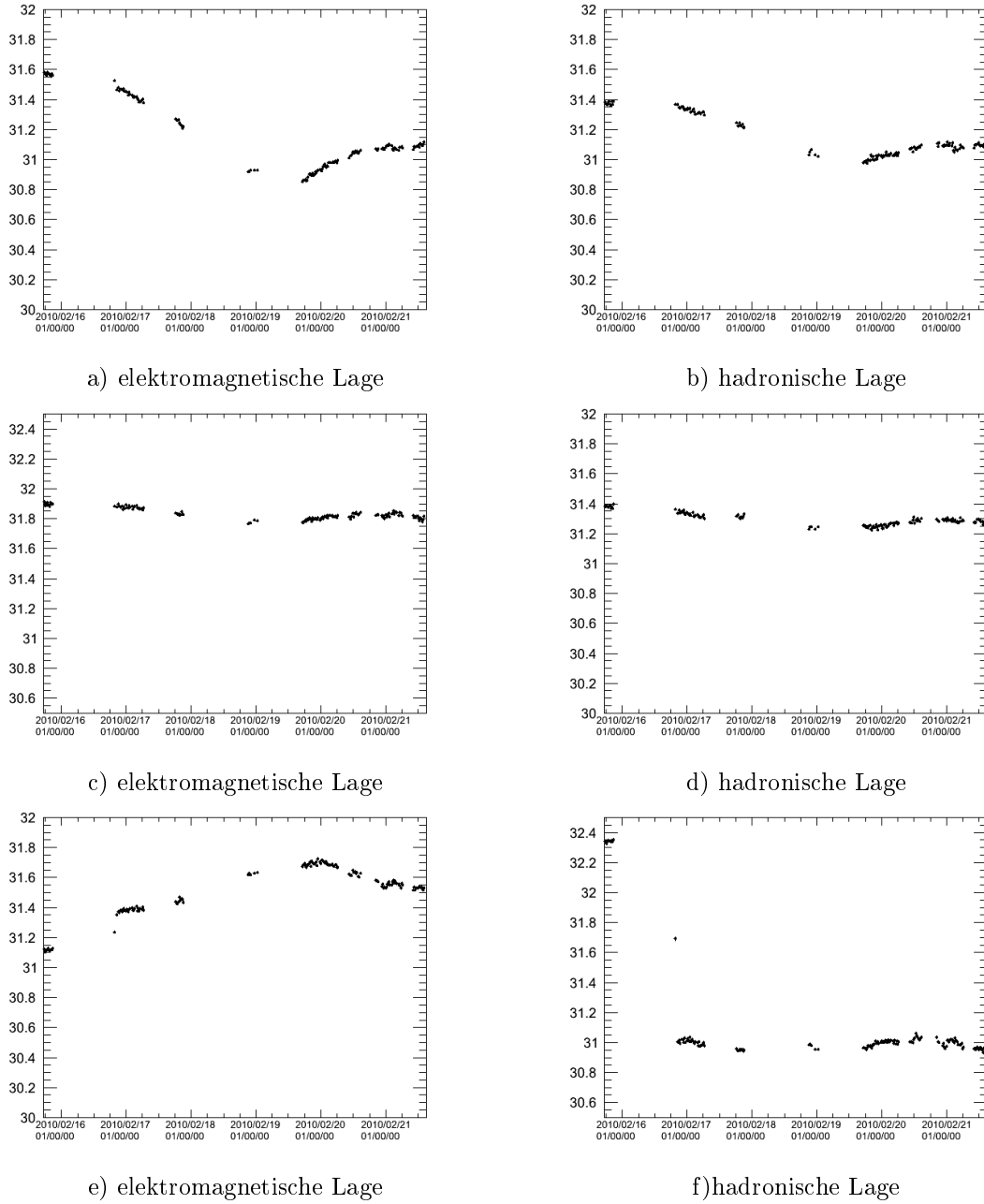


Abbildung 2.11: Verlauf des Pedestals über alle Runs der Februarwoche für 3 verschiedene Kanäle/Triggertower

Ein deutlicheres Bild zeigen die Runs vom 05.05.-06.05. In Abb. 2.12 ist ein Beispielkanal gezeigt, die drei verwendeten Runs sind rot markiert und beschriftet. Die beobachteten Verläufe des Pedestals sind in Abb. 2.12 wieder beispielhaft für 3 verschiedene Kanäle (von oben nach unten) gezeigt. Die Mehrheit der Triggertower weist einen monoton steigenden Pedestal auf, wie in 2.13 (a) und (b) zu sehen ist. Der Anstieg variiert von 0,1 ADC-Wert bis hin zu 0,4-0,5 ADC-Werten über den gesamten Zeitraum. Einige wenige Kanäle fallen auch (2.13 (c)) oder verlaufen relativ konstant bei einem Wert (2.13 (d)). Es lässt sich weiterhin feststellen, dass Unterschiede zwischen elektromagnetischer und hadronischer Lage bei gleichem $\eta - \phi$ -Wert bestehen. Generell lässt sich der Anstieg des Pedestals, der schon

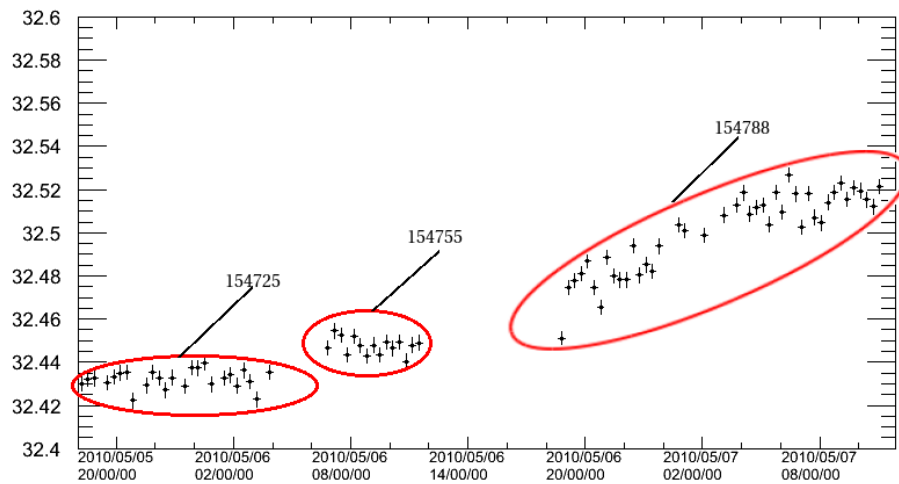
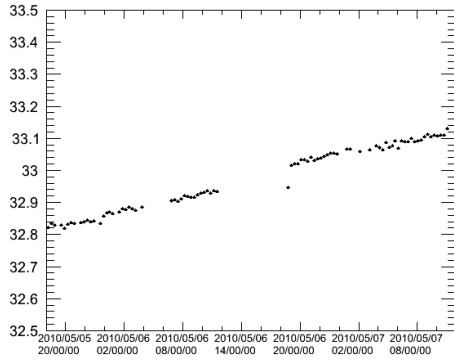
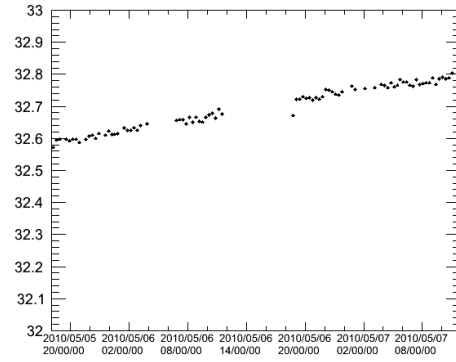


Abbildung 2.12: Beispiel für den zeitlichen Pedestalverlauf eines Kanals vom 05.-06.Mai. Die drei Runs sind klar zu erkennen.

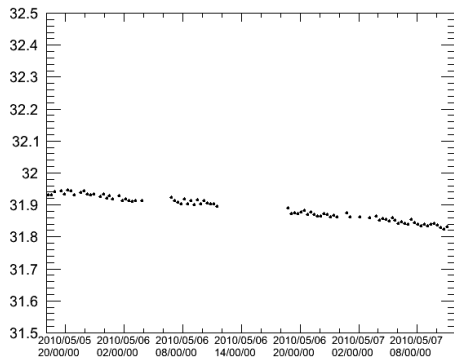
in den vorherigen beiden Analyseteilen entdeckt wurde, hiermit bestätigen. Unklar ist, ob der Pedestal danach wieder sinkt, weiter steigt oder sich bei dem höheren/tieferen Wert stabilisiert. Die Betrachtung weiterer Runs, die diese Frage eventuell klären könnte, wäre der nächste Schritt der Analyse.



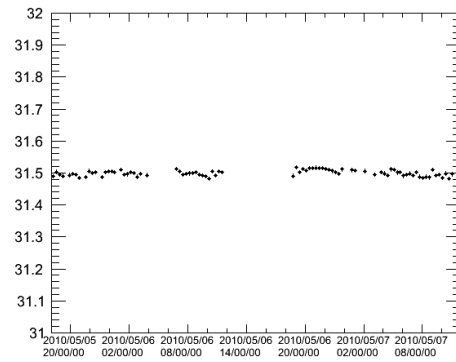
a) elektromagnetische Lage



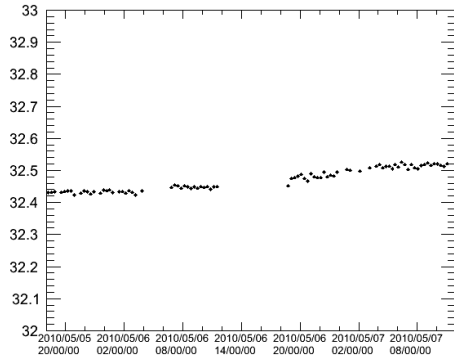
b) hadronische Lage



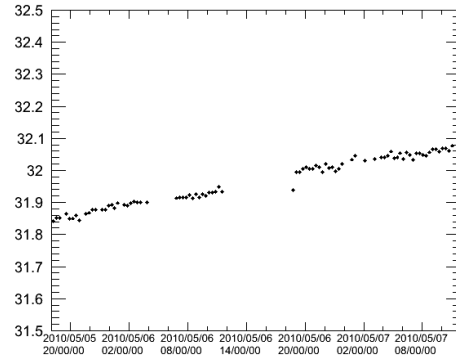
c) elektromagnetische Lage



d) hadronische Lage



e) elektromagnetische Lage



f) hadronische Lage

Abbildung 2.13: Verlauf des Pedestals über alle Runs der Maiwoche für 3 verschiedene Kanäle/Triggertower

2.6 Pedestals und L1_EM Raten

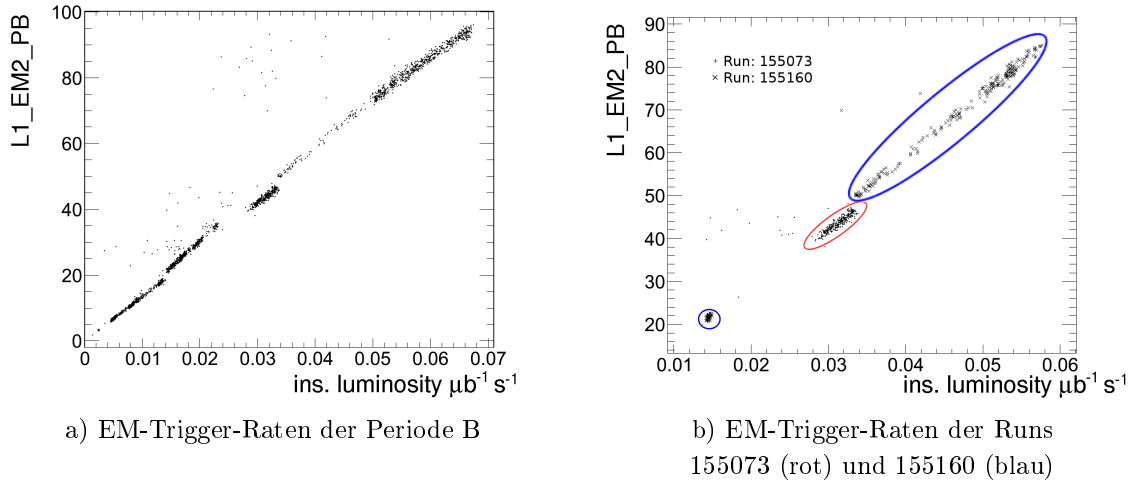


Abbildung 2.14: $L1_EM$ -Trigger Raten von Periode B in Abhängigkeit von der instantanen Luminosität [Diagramme erstellt von F. Kleine-Limberg]

Im Juli 2010 wurden Unterschiede in den $L1_EM$ -Raten der Periode B festgestellt (Abb. 2.14). Die Vermutung war, dass eine Veränderung im Pedestal hierfür verantwortlich war. Um dies zu untersuchen, wurde der Pedestal der Runs 155073 und 155160, zwischen denen die veränderten Raten auftraten, analysiert. In Abb. 2.14 (b) ist die veränderte EM-Rate der beiden Runs in Abhängigkeit von der instantanen Luminosität gezeigt. Erwartet wird ein linearer Anstieg der Rate mit größer werdender Luminosität, wie es der Zusammenhang (1.1) vorhersagt. Es ist jedoch erkennbar, dass Run 155073 (rot umkreist) eine geringere Rate aufweist als Run 155160 (blau umkreist), d.h. der Verlauf ist nicht linear, sondern unstetig. Tatsächlich findet man bei der Untersuchung des Pedestalverlaufs der beiden Runs ein Ansteigen, wie in Abb. 2.15 beispielhaft für die zwei elektromagnetischen Kanäle 1f0d02 und 1100401 gezeigt. Dabei ist der Pedestal von Run 155160 um bis zu 0,4 ADC-Werte höher als bei Run 155073. Betrachtet man die $\eta - \phi$ -Mappe der Differenz der mittleren Pedestals der beiden Runs in Abbildung 2.16, so erkennt man, dass eine positive Differenz von 0,1 bis 0,3 ADC-Werte für die meisten Kanäle der Fall ist, was ein Ansteigen des Pedestals zu Run 155160 hin bedeutet.

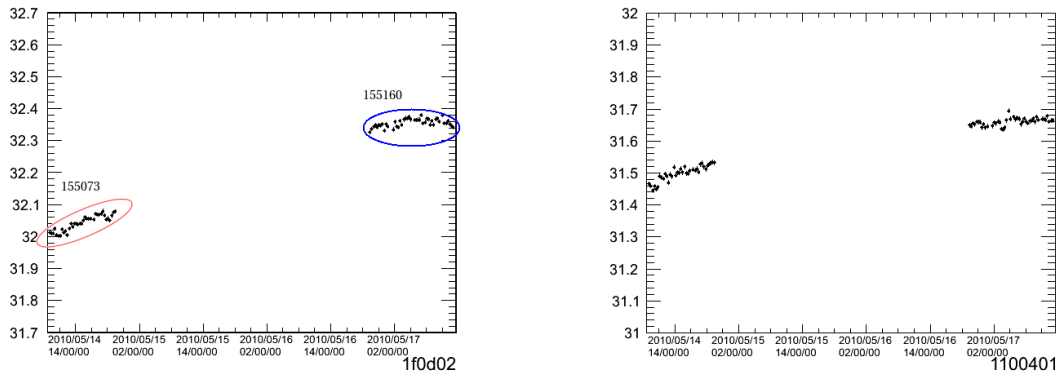


Abbildung 2.15: Pedestalverlauf für zwei Kanäle

Allerdings existieren auch einige Kanäle, beziehungsweise analoge Input-Boards, mit negativer Differenz, in denen der Pedestal fällt. Solch ein fallender Pedestal wurde für einen Kanal des in Abb. 2.16 rot eingekreisten AnIn-Boards untersucht. Das Board ist in Abb. 2.17 (a) vergrößert dargestellt. Aus der $\eta - \phi$ -Position wurde die CoolID des dunkelblauen, rot eingekreisten Triggertowers als 110802 bestimmt. Der Pedestalverlauf für diesen Kanal ist in Abb. 2.17 (b) gezeigt. Er fällt tatsächlich stetig ab.

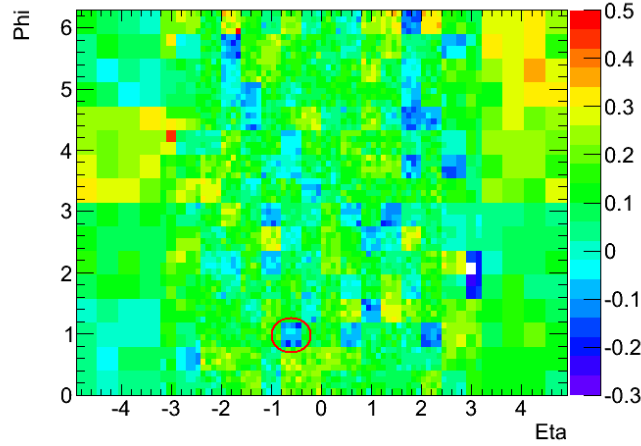
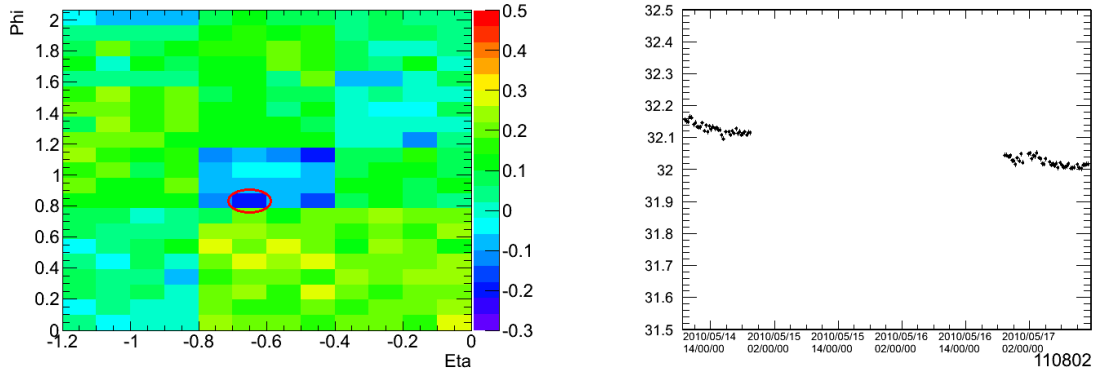


Abbildung 2.16: $\eta - \phi$ -Mappe der Differenz des mittleren Pedestals von Run 155160-155073 in der elektromagnetischen Lage



a) Ausschnitt der $\eta - \phi$ -Mappe in Abb. 2.16 b) Zeitlicher Verlauf des Pedestals für Kanal 110802

Abbildung 2.17: Pedestalverlauf für einen Kanal, in dem der Pedestal von Run 115073 auf Run 115160 fällt

Aus den obigen Diagrammen lässt sich schließen, dass der Pedestal tatsächlich bis auf wenige Ausnahmen für die meisten Triggertower von Run 115073 auf Run 115160 gestiegen ist, d.h. bei Run 155073 niedriger ist. Das erklärt die geringere Trigger-Rate: ein niedrigerer Pedestal bedeutet, dass mehr Energie benötigt wird, um die Triggerschwelle zu überwinden, als bei einem höheren Pedestal der Fall wäre. Ereignisse mit höherer Energie kommen jedoch seltener vor, weshalb die Triggerrate geringer ist.

Es lässt sich also feststellen, dass auch geringe Veränderungen des Pedestals von wenigen Zehnteln von ADC-Werten einen merklichen Einfluss auf die Triggerrate haben können.

2.7 Diskussion der Ergebnisse

Die Ergebnisse zeigen, dass der Pedestal Schwankungen aufweist, die beobachtbar sind und den Trigger auch beeinflussen, sein Verhalten aber nicht grundsätzlich verändern. In den Datensätzen vom Mai wurde ein Anstieg des Pedestals festgestellt. Die Strukturen der Pedestalvariationen sind ähnlich zur Struktur der AnIn-Boards. Dies ist verständlich, da der Pedestal von einem DAC zum Signal hinzuaddiert wird, der sich auf je einem AnIn-Board befindet, d.h. ein Offset oder ein Ansteigen würde alle 16 Kanäle betreffen. Interessant ist jedoch, dass die Verschiebung der unterschiedlichen analogen Input-Boards ein und desselben PreProcessorModuls keine Korrelation aufweisen, da sie scheinbar willkürlich ansteigende und abfallende Pedestals aufweisen. Eine Vermutung wäre, dass der gleiche Effekt, der an einem PPM die Pedestalverschiebung verursacht, für ein AnIn-Board einen positiven und für ein anderes einen negativen Koeffizienten hervorruft. Allerdings erklärt dies nicht, warum sich auf den PPMs auch immer wieder Boards finden, die nahezu stabil verlaufen, von dem Effekt also unbeeinflusst scheinen.

Die Veränderungen innerhalb eines Runs sind relativ gering, aber zwischen Anfang und Ende kommt es durchaus zu sichtbaren Unterschieden. Diese sind jedoch nicht für alle Kanäle gleich, weder in Betrag noch in Richtung. Außerdem konnte gezeigt werden, dass sich Verschiebungen über mehrere Runs hinweg über einen großen Zeitraum fortsetzen. Der Anstieg um 0,5 bis 1 ADC-Wert ist durchaus groß und kann das Verhalten des Triggers beeinflussen. Wie genau das langfristige Verhalten des Pedestals aussieht, ist jedoch noch nicht geklärt. Die Beobachtungen, die bei den Daten der Februarwoche gemacht wurden, lassen vermuten, dass es zu Oszillationen mit Perioden von mehreren Tagen kommt. Mehr Aufschluss darüber könnte man aus der Betrachtung des Langzeitverhaltens der Daten aus dem Mai erhalten. Diese indizieren ein monoton steigendes bzw. fallendes Verhalten des Pedestals. Falls es regelmäßige Oszillationen gibt, so sind diese mit ihrer großen Periode hier nicht erkennbar.

Es ist nicht klar, woher die Schwankungen im Pedestal kommen. Eine Vermutung ist, dass Variationen der Temperatur in den Crates dafür verantwortlich sind. Allerdings lässt dies die Frage offen, warum die einzelnen Pedestals so unterschiedlich darauf reagieren. In einer weiteren Studie könnte dies untersucht werden, indem zum Beispiel der an den PPMs gemessene Temperaturverlauf mit dem des Pedestals verglichen wird. Dies müsste jedoch für jeden Kanal einzeln geschehen, um eine Aussage darüber treffen zu können, ob und inwiefern die Temperatur einen Einfluss auf den Pedestal hat und wieso der resultierende Schwankungskoeffizient so stark variiert.

Ein weiterer Schritt wäre das Vergleichen des wahren Pedestalwertes mit dem in einem DAC-Scan eingestellten und dem in einem Pedestalarun danach gemessenen Wert. Die Antwort auf die Frage, ob das Schema der Variation nach einem Zurücksetzen des Pedestals fortgesetzt wird (der Pedestal also weiterhin ansteigt oder die Oszillation in der gleichen Phase fortführt), könnte ein besseres Verständniss des Pedestalverhaltens bedeuten.

Kapitel 3

Zusammenfassung

In dieser Arbeit wurden Studien zur Betriebsstabilität der PPMs, einer zentralen Komponente des ATLAS Level-1-Kalorimeter-Triggers, durchgeführt. Insbesondere wurde dabei auf den Pedestal, einen von außen vorgegebenen Wert, der die Kalorimetersignale in einen messbaren Bereich anhebt, eingegangen. Nachdem in einigen Datennahmeperioden Variationen in den Level 1-Triggerraten auftraten, wurde der Grund hierfür bei einer Schwankung des Pedestals vermutet, was Anlass zu der folgenden Studie gab. Das Verhalten des Pedestals wurde in jedem Triggertower für verschiedene Datennahmeperioden und Zeiträume in 3 Analyseschritten untersucht und quantifiziert. Als Datensätze wurden mehrere Runs des Cosmicstreams vom Februar und Mai 2010 verwendet. Um eventuelle Signale im Detektor herauszufiltern wurde ein Schnitt auf ADC-Werte, die größer als 40 sind, gemacht. Der Pedestal selbst wurde als Mittelwert der ADC-Werte einer Auslese errechnet.

Im ersten Teil der Analyse wurden die gemittelten Pedestals zwischen benachbarten Runs miteinander verglichen. Dafür wurde der mittlere Pedestal eines Runs für jeden Kanal berechnet und Differenzen des mittleren Pedestals zwischen zwei Runs bestimmt. Hierbei ließ sich beobachten, dass der Pedestal des gleichen Kanals zwischen zwei Runs bis zu 0,3 ADC-Werten ansteigt bzw. abfällt. Zudem wurde die Struktur der Triggerelektronik in Form der analogen Input-Boards insofern sichtbar, als dass die $\eta - \phi$ -Mappen eine 4×4 -Blockstruktur aufwiesen. Das bedeutet, dass die Kanäle eines AnIn-Boards in Betrag und Richtung sehr ähnliche Variationen zeigten.

Im zweiten Teil wurden kurzzeitige Variationen des Pedestals analysiert indem mehrere Pedestals eines Kanals gemittelt wurden und ihr zeitlicher Verlauf betrachtet wurde. Für den Run 147787 vom Februar konnte ein abfallender Pedestal, der schon im vorherigen Teil der Analyse vermutet wurde, bestätigt werden, wenn auch nicht systematisch auftretend. Für die 3 Runs vom Mai wurde ein Anstieg beobachtet, wobei wieder die 4×4 -Blockstruktur der AnIn-Boards zu erkennen war. Die Vermutung, dass Schwankungen des Kühlkreislaufs der PPMs einen Einfluss auf den Pedestal hat, konnte nicht bestätigt werden.

Zuletzt wurde der Pedestalverlauf über einen längeren Zeitraum, also über mehrere Runs hinweg, betrachtet. Für die Datensätze vom Februar ließ sich hierbei auf kein eindeutiges Verhalten schließen. Aus dem Verlauf lässt sich auf eine eventuelle Oszillation schließen. Um dies zu bestätigen, müssten die Analyse auf einen größeren Zeitraum, also mehr Runs, ausgeweitet werden. Im Mai ließ sich in den meisten Kanälen ein monotones Ansteigen verzeichnen, da der Zeitraum jedoch viel kürzer ist als der vom Februar, lässt sich eine Oszillation hier weder ausschließen noch bestätigen.

In einer zusätzlichen Analyse wurde ein weiterer Datensatz vom Mai 2010 untersucht, da in einem der beiden Runs eine niedrigere Triggerrate als in einem anderen festgestellt wurde und ein eventueller Zusammenhang mit einer Variation im Pedestal vermutet wurde. Es konnte gezeigt werden, dass auch der Pedestal für diesen Run geringer ist (etwa 0,4 ADC-Werte) als in dem darauffolgenden, d.h. eine Variation des Pedestals tatsächlich für Änderungen der Raten verantwortlich ist.

Aus der Analyse lässt sich schließen, dass der Pedestal zwischen Runs um bis zu 0,5 ADC-Werten steigt und fällt, was sich auch auf die Triggerraten auswirkt. Eine quantitative Aussage, ob der Pedestal generell ansteigt oder abfällt, kann jedoch nicht getroffen werden. Es wird vermutet, dass es zu Oszillationen mit Perioden von mehreren Tagen kommt. Zur Überprüfung dieser These müssten weitere Daten analysiert werden. Die immer wieder auftauchende Struktur der analogen Input-Boards legt die Vermutung nahe, dass der Grund für die Pedestalschwankungen in den einzelnen AnIn-Boards liegt. Fraglich ist jedoch, ob der Effekt durch äußere Einflüsse zustande kommt, da die verschiedenen AnIn-Boards eines PPMs völlig unterschiedlich und unabhängig voneinander schwanken. Sollte die

Ursache von außen kommen, wie zum Beispiel durch Temperaturunterschiede, so müsste geklärt werden, warum dieser Effekt an den AnIn-Boards eines PPMs unterschiedliche Koeffizienten hervorruft.

Abschließend lässt sich sagen, dass Schwankungen im Pedestal festgestellt, bestätigt und teilweise charakterisiert werden konnten, diese jedoch das Triggerverhalten nicht maßgeblich verändern. Ihre Ursache ist ungeklärt. Ein genaueres Verständnis des Pedestals erfordert daher weitere Betrachtungen.

Literaturverzeichnis

- [1] The ATLAS Collaboration, G. Aad et al., The ATLAS Experiment at the CERN Large Hadron Collider, JINST 3 (2008) S08003
- [2] R. Achenbach et al., The ATLAS Level-1 Calorimeter Trigger, JINST 3 (2008) P03001
- [3] R. Achenbach et al., Testing and calibrating analogue inputs to the ATLAS Level-1 Calorimeter Trigger, Topical Workshop on Electronics for Particle Physics, Naxos, Greece, 15 - 19 Sep 2008, pp.467-471
- [4] The ATLAS group at the KIP Heidelberg, The PreProcessor Module (PPM) for the ATLAS Level-1 Calorimeter Trigger, Version 1.0, April 2009
- [5] <http://www.lhc-facts.ch/>
- [6] Florian Kleine-Limberg, Energiekalibration des ATLAS-Level-1 Kalorimetertriggers mit Elektronen, Diplomarbeit, 2010
- [7] Prof. H.-C. Schultz-Coulon, The Physics of Particle Detectors, Skript, 2010
- [8] <http://lhc-machine-outreach.web.cern.ch/lhc-machine-outreach/>
- [9] <https://edms.cern.ch/nav/LHCPM001>: LHC Baseline
- [10] <http://lhc.web.cern.ch/lhc/>
- [11] <http://public.web.cern.ch/public/en/lhc/LHC-en.html>

Erklärung

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

Heidelberg, den 20.08.2010,

Anhang

Anhang A

CoolID

Die CoolID setzt sich wie folgt zusammen:

$$0\alpha 1\beta 0\gamma 0\delta \tag{A.1}$$

$\delta \hat{=}$ Kanal 0-3

$\gamma \hat{=}$ Submodul 0-9,A-F (MCM, hexadezimal)

$\beta \hat{=}$ Modul 0-9,A-F (PPM, hexadezimal)

$\alpha \hat{=}$ Crate 0-7

Anhang B

Das PPM

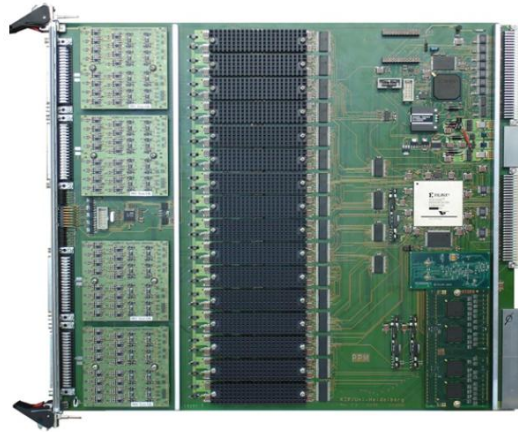


Abbildung B.1: Das PreProcessor-Modul mit 4 analogen Input-Boards (AnIn-Board) und 16 MultiChipModulen [3]

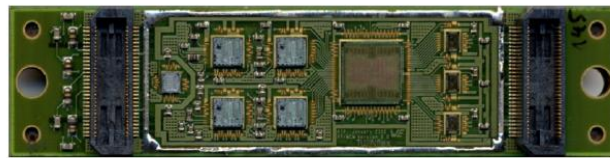


Abbildung B.2: Das MultiChipModul (MCM) mit den 4 FACDs, die je einen Triggertower bearbeiten[3]

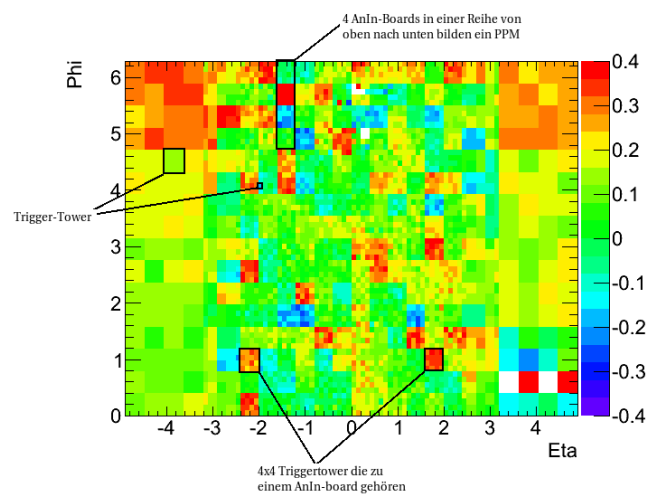
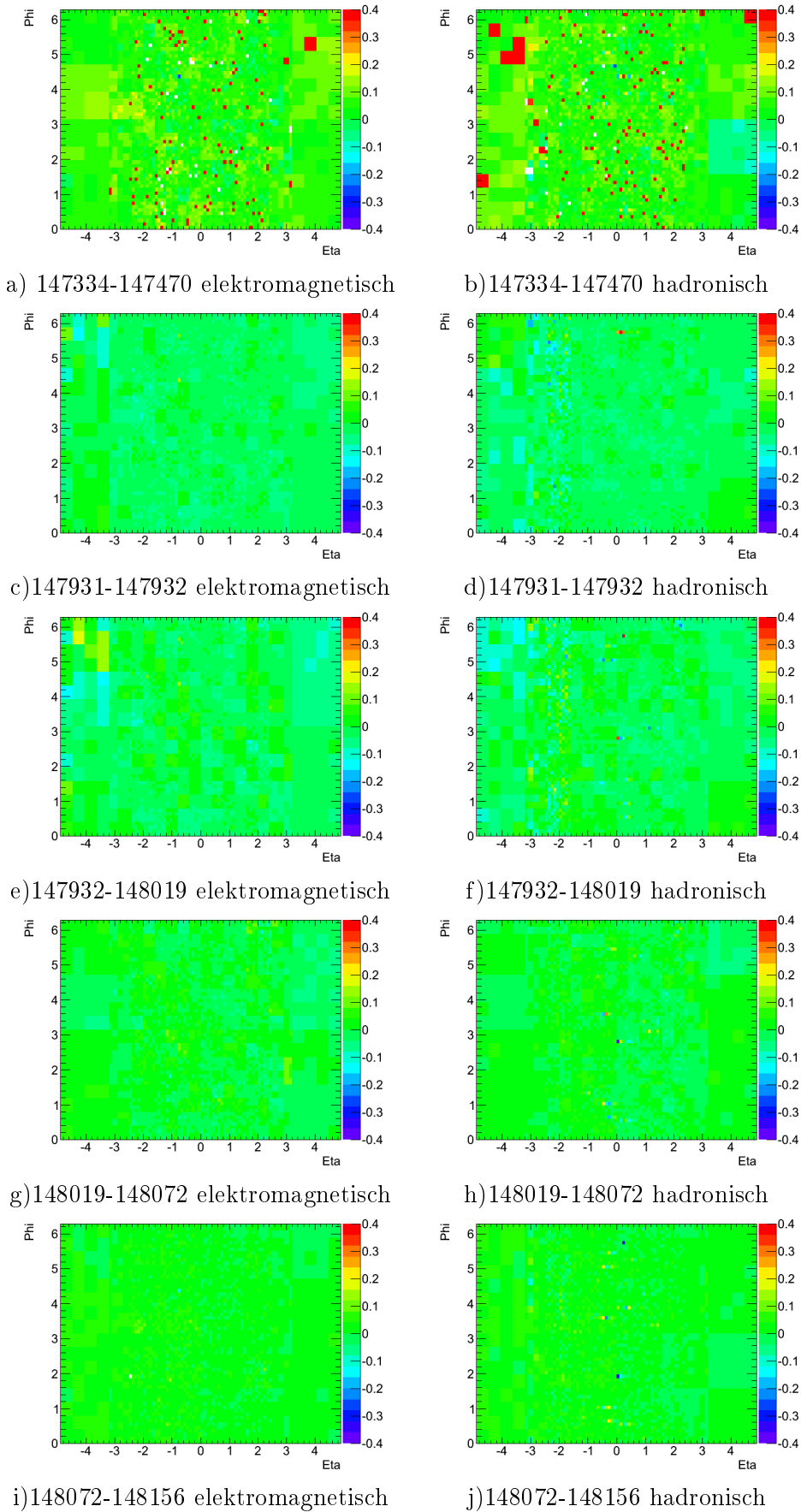


Abbildung B.3: Beispiel $\eta - \phi$ -Mappe

Anhang C

Mittelwerte und Differenzen zwischen Runs

Abbildung C.1: $\eta - \phi$ -Mappen der Differenz der mittleren Pedestals, Februar-Runs

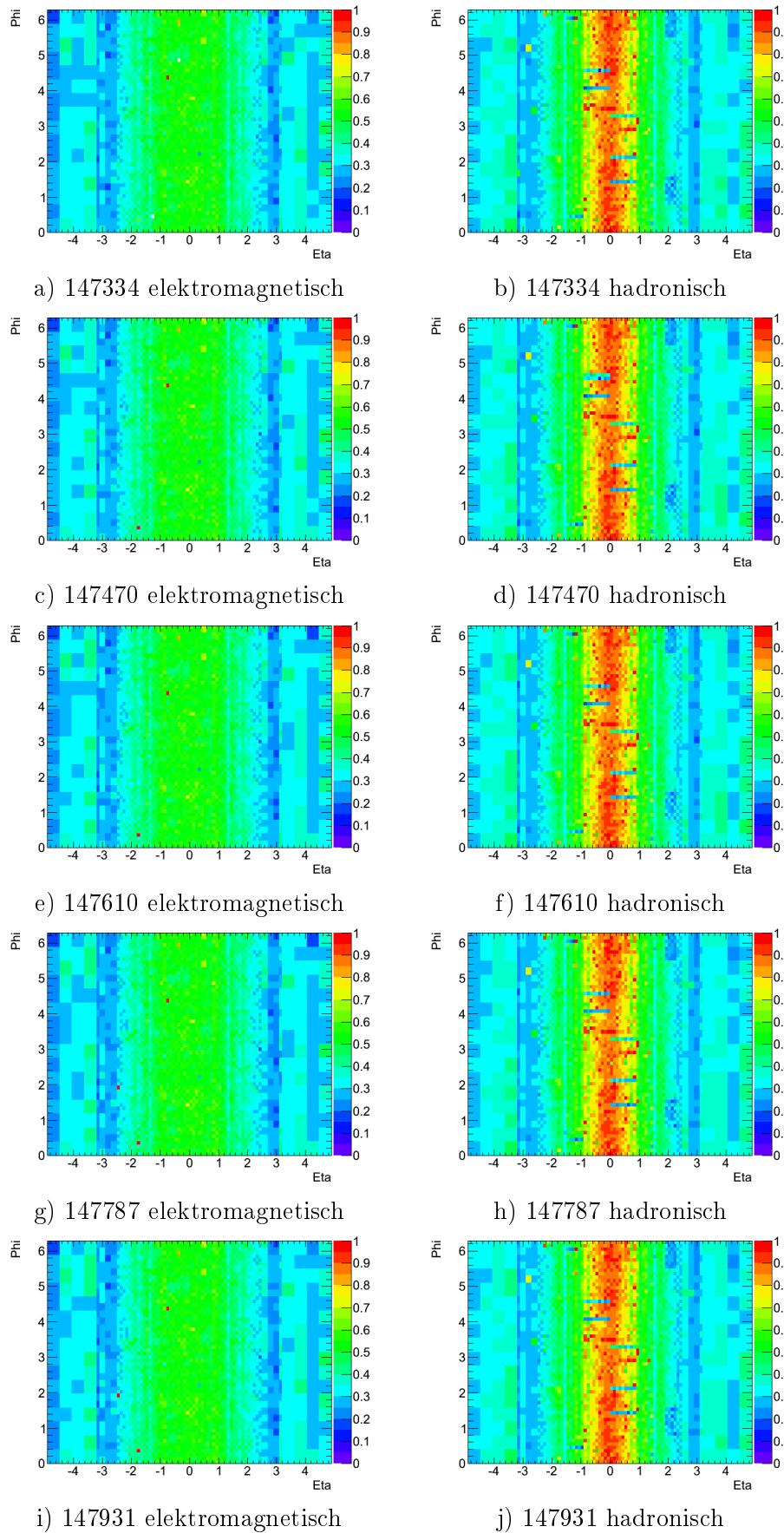


Abbildung C.2: RMS vom Mittelwert für die Runs der Februarwoche

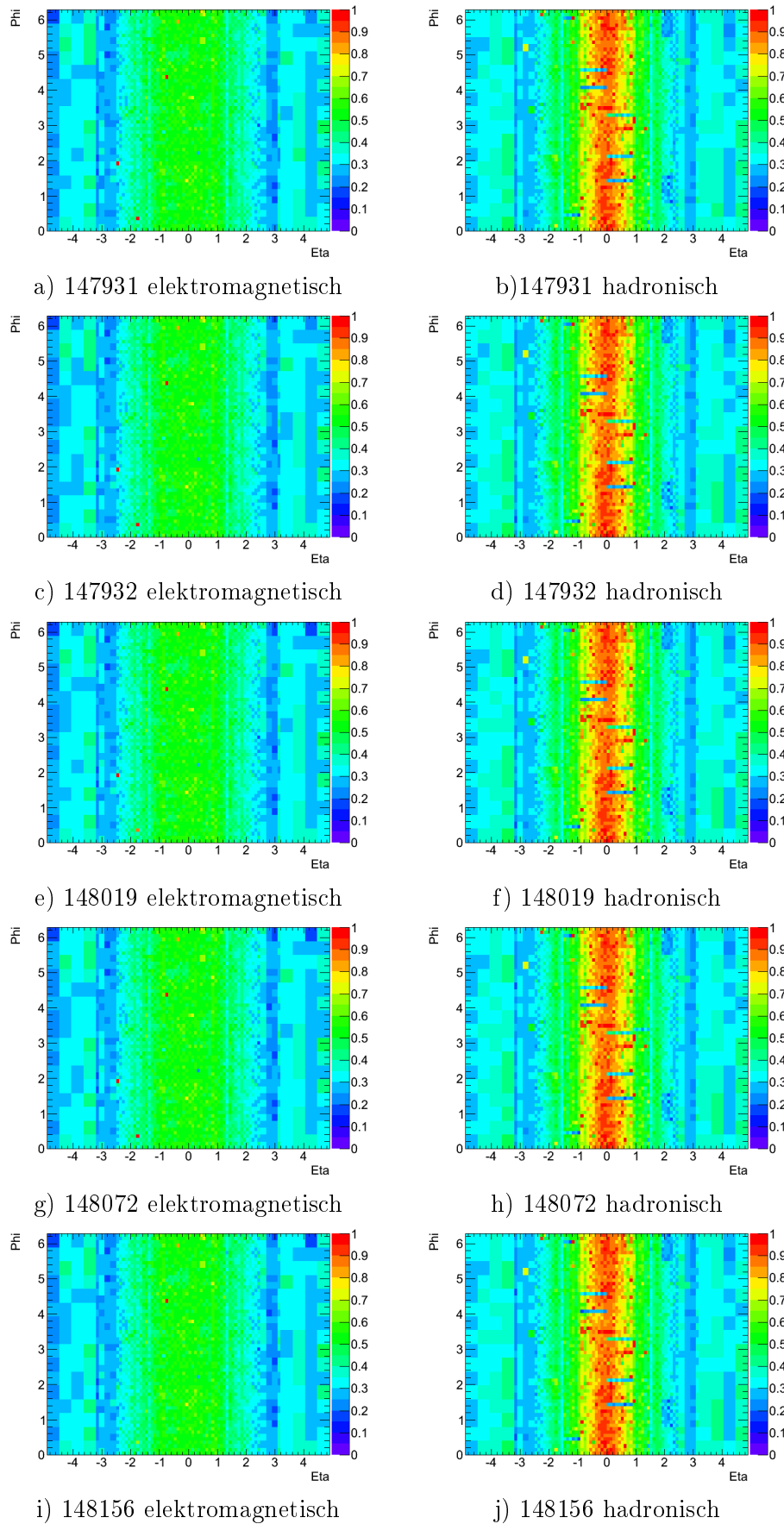
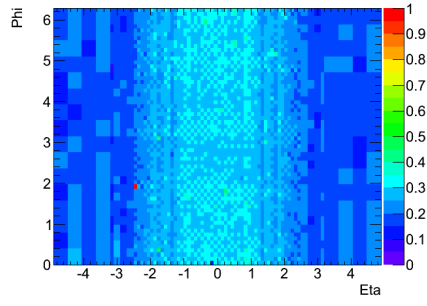
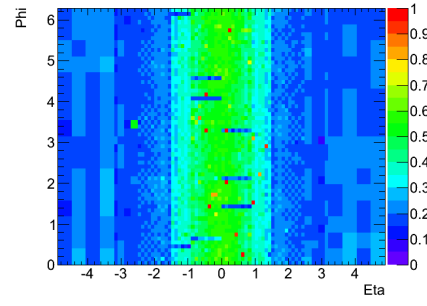


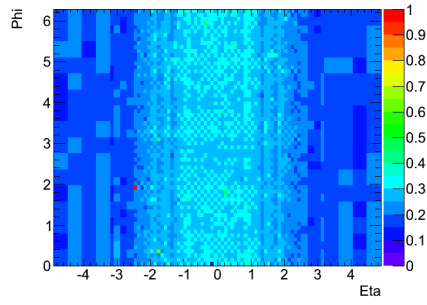
Abbildung C.3: RMS vom Mittelwert für die Runs der Februarwoche



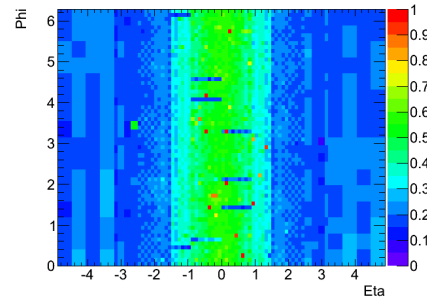
a) 154725 elektromagnetisch



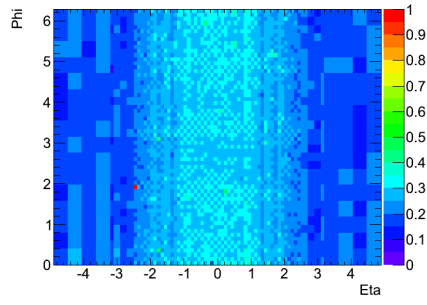
b) 154725 hadronisch



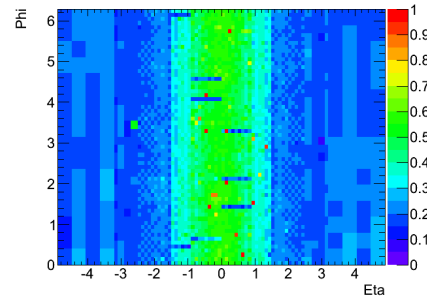
c) 154755 elektromagnetisch



d) 154755 hadronisch



e) 154788 elektromagnetisch

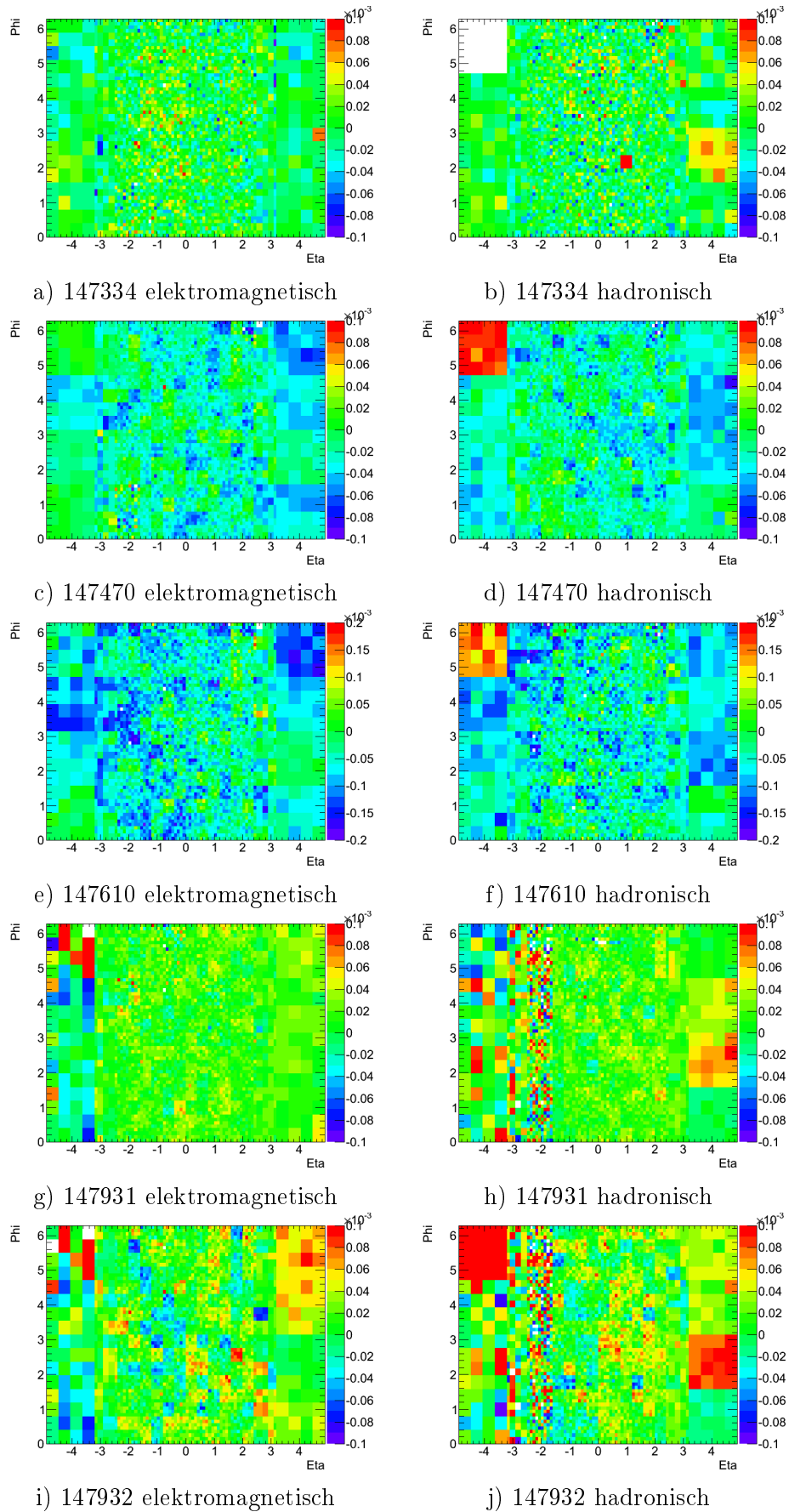


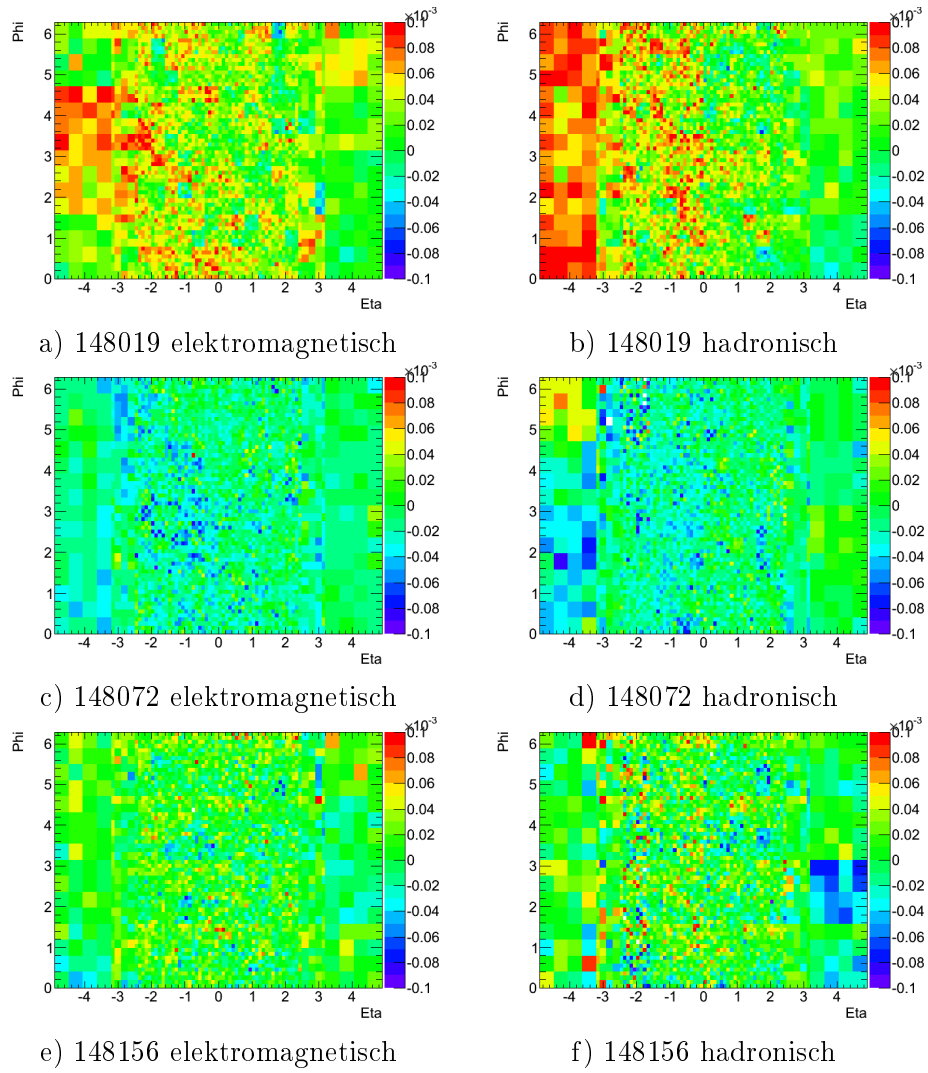
f) 154788 hadronisch

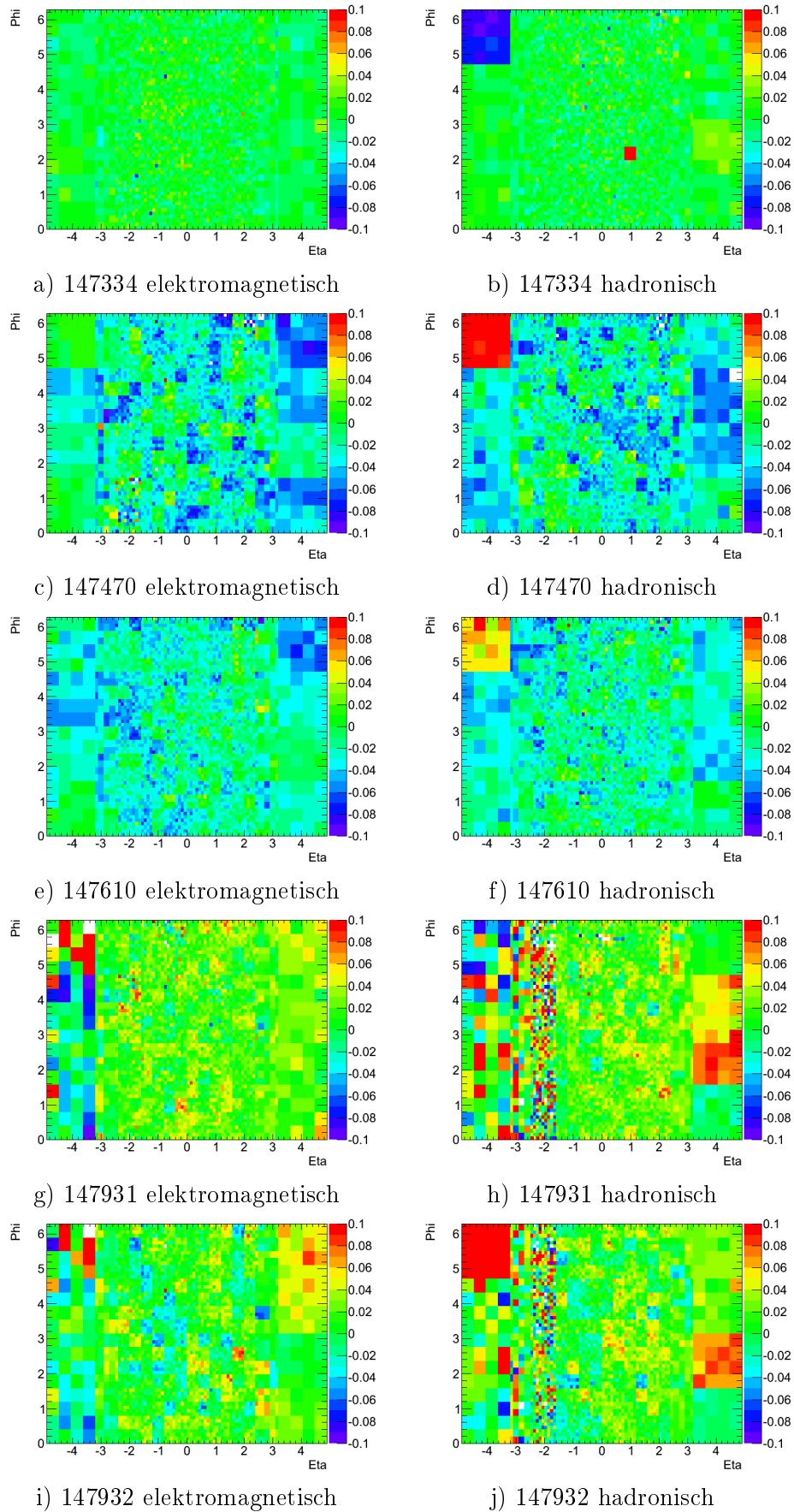
Abbildung C.4: RMS vom Mittelwert für die Runs der Maiwoche

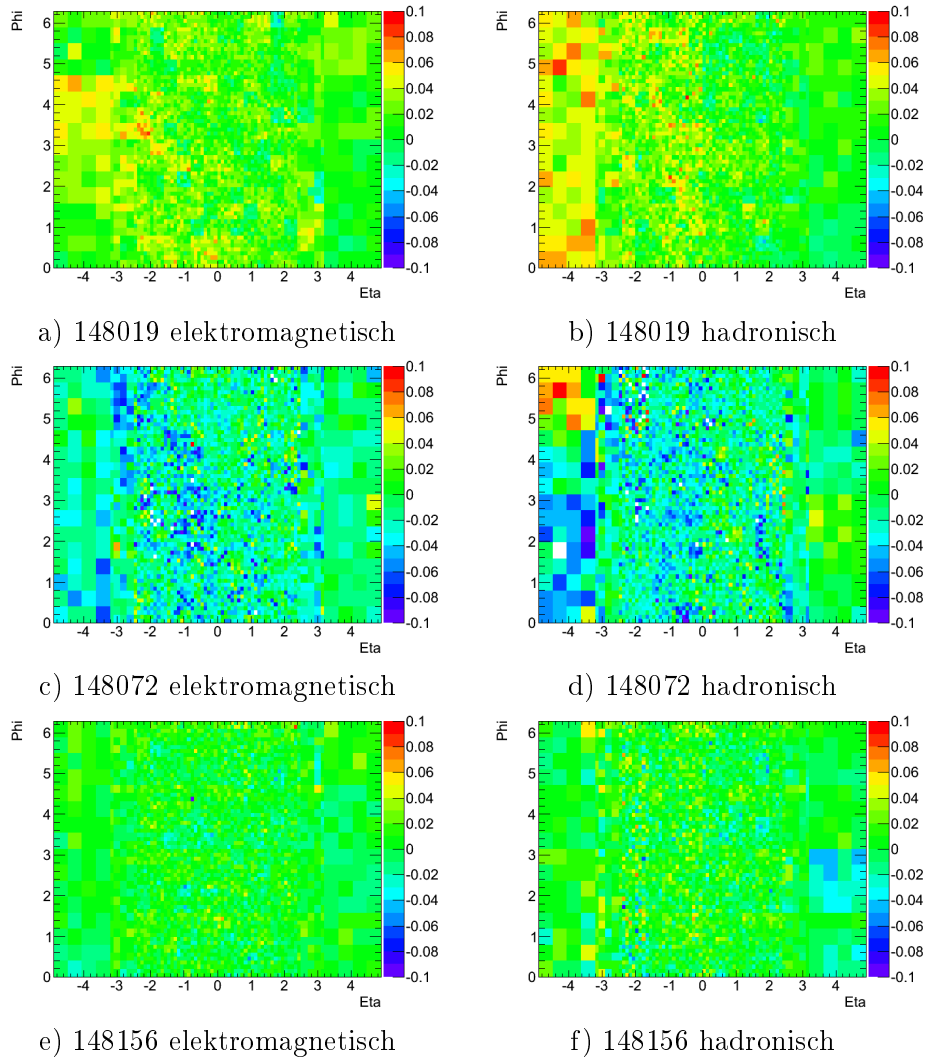
Anhang D

Kurzzeitige Variationen des Pedestals

Abbildung D.1: $\eta - \phi$ -Mappen der gefitteten Steigungen

Abbildung D.2: $\eta - \phi$ -Mappen der gefitteten Steigungen

Abbildung D.3: $\eta - \phi$ -Mappen der Differenz zwischen Anfang und Ende

Abbildung D.4: $\eta - \phi$ -Mappen der Differenz zwischen Anfang und Ende

Anhang E

Langzeitige Variationen des Pedestals

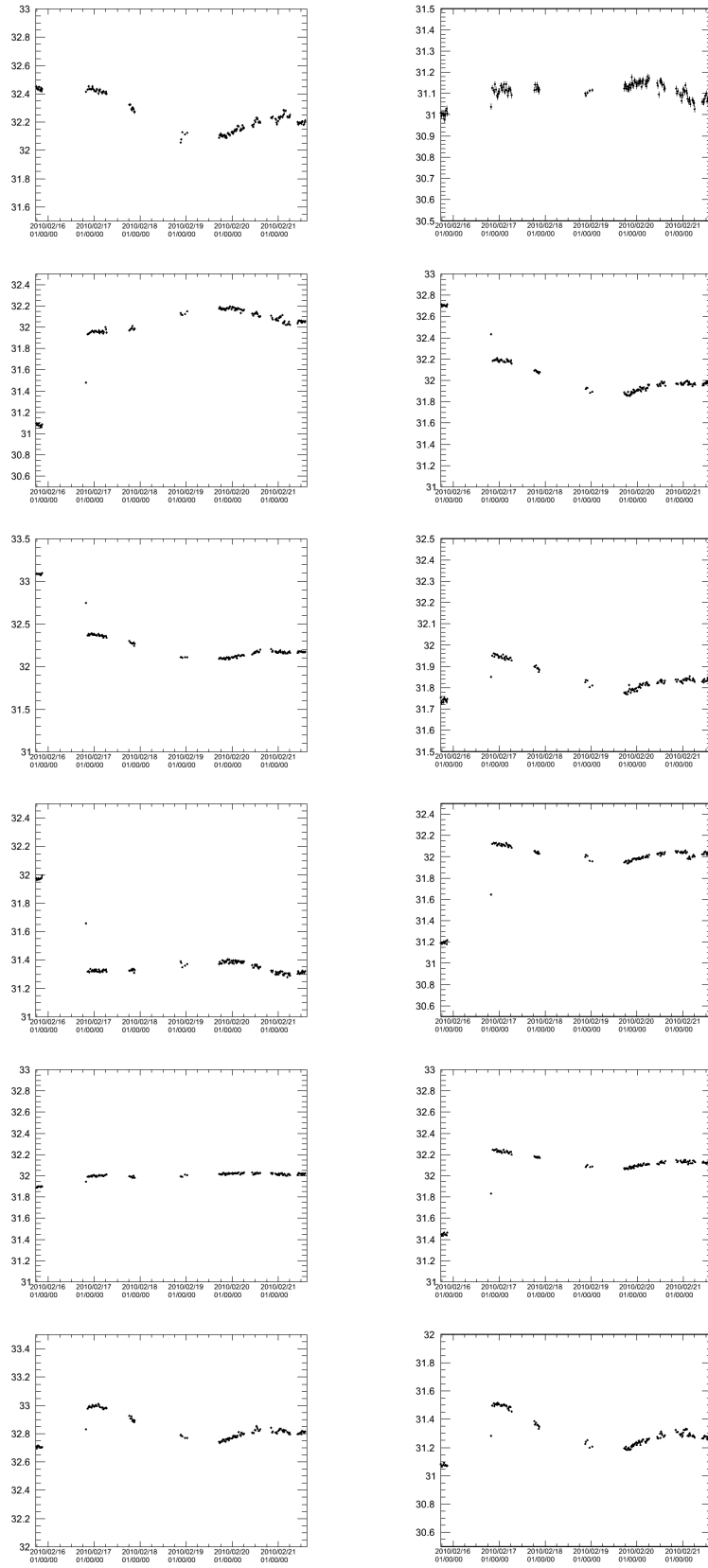


Abbildung E.1: Verlauf des Pedestals vom 15.02. bis 21.02.

