

Goethe Universität
Frankfurt am Main
Fachbereich 13, Physik



Pedestal, Noise und Common Mode Effect Analyse an einem Kammerprototypen des ALICE TPC Run 3 Upgrade

Masterthesis

Hendrik Schulte

Institut für Kernphysik Frankfurt

28. März 2019

Erstgutachter: Prof. Dr. Harald Appelshäuser

Zweitgutachter: Prof. Dr. Christoph Blume

Inhaltsverzeichnis

1. Einleitung	5
2. A Large Ion Collider Experiment	7
2.1. Large Hadron Collider	7
2.2. Das ALICE Detektorsystem	9
2.3. Time Projection Chamber	11
3. ALICE TPC Upgrade	13
3.1. Erneuerung der Ausleseammern	13
3.2. Erneuerung der Ausleseelektronik	14
3.3. Betrieb der neuen TPC Auslese	16
4. Physikalischer Hintergrund	17
4.1. Quark-Gluon Plasma - Mithilfe von ALICE untersuchte Physik	17
4.2. Pedestals und Noise - physikalisch-technischer Aspekt des neuen TPC Ausleseammernmodells	21
4.3. Common Mode Effect - physikalischer Aspekt des neuen TPC Ausleseammernmodells	22
5. Experimenteller Aufbau und Ablauf des Beamtests	25
5.1. Aufbau der Testkammer am Proton Synchrotron	25
5.2. Weitere eingesetzte Detektoren	26
5.3. Skizzierter Weg der Datenverarbeitung	27
5.4. Durchführung des Beamtests	27
6. Pedestals und Noise	31
6.1. Zielsetzung der Untersuchung	31
6.2. Vorgehen bei Untersuchung von Pedestals und Noise anhand der Testbe- amdaten	32
6.3. Ergebnisse der Untersuchung von Pedestals and Noise	35

7. Common Mode Effect	45
7.1. Zielsetzung der Analyse	45
7.2. Selektion der Daten bei der Analyse des Common Mode Effect	45
7.3. Vorgehen bei der Analyse des Common Mode Effect des neuen Auslese- kammertyps	48
7.4. Analyseergebnisse zum Common Mode Effect	52
8. Zusammenfassung	69
Anhang A.	71
Literaturverzeichnis	79
Danksagung	81
Erklärung nach §30 (12) Ordnung für den Bachelor- und den Masterstudiengang	83

1. Einleitung

Mit Beginn des Jahres 2021 wird der LHC (Large Hadron Collider) am CERN seine Arbeit nach dem Long Shutdown 2 aufnehmen und in die Run-3-Betriebsperiode eintreten. Die Rate der Blei-Blei Kollisionen wird von da an 50 kHz betragen. Um diesen neuen experimentellen Anforderungen gerecht zu werden, besteht die Notwendigkeit ALICE („A Large Ion Collider Experiment“) technisch anzupassen. Diese Arbeit befasst sich mit den Umrüstungsmaßnahmen an der ALICE TPC (Time Projection Chamber). Bei diesem Detektor werden die bis zum Beginn des Long Shutdown 2, Ende 2018, zum Auslesen benutzten Vieldrahtkammern durch eine Vier-Ebenen-Anordnung mit GEMs (Gas Electron Multiplier) ersetzt. Kontinuierliches Auslesen der ALICE TPC wird auf diese Weise möglich.

Die Ausleseammern, in denen GEMs und Ausleseelektronik zusammengebracht werden, haben verschiedene Eigenschaften, die es zu verstehen und deren Auswirkung es zu kennen gilt. Diese Eigenschaften, mit denen sich diese Arbeit beschäftigt, sind Pedestals und Noise sowie der sogenannte Common Mode Effect. Für Pedestals und Noise ergibt sich die Fragestellung nach dem Betrag und der Stabilität beider Größen. Ebenso soll festgestellt werden, ob das Designziel, den Betrag des Noise bei einem Maximalwert von einem ADC zu halten, erreicht wird. Kennt man beide Größen, kann im späteren Messbetrieb von ALICE deren verzerrender Einfluss auf die Messdaten korrigiert werden. Aus diesem Grund soll auch der Common Mode Effect in dieser Arbeit sowohl quantitativ als auch in seinem Verhalten erfasst werden. Hierzu werden Messdaten aus einem Beamtest im Jahr 2017 am CERN PS (Proton Synchrotron) mit einem Prototypen der neuen Ausleseammern ausgewertet.

Im folgenden Kapitel wird zunächst das ALICE Experiment selbst thematisiert. Im daran anschließenden Kapitel wird der physikalische Hintergrund dessen, was ALICE zu vermessen beabsichtigt, und der in dieser Arbeit untersuchten hardware-spezifischen Physik erläutert. Die darauf folgenden Kapitel geben den experimentellen Aufbau sowie die Durchführung des Beamtests wieder. Im Anschluss daran werden das Vorgehen bei der Datenauswertung in dieser Arbeit beschrieben sowie die gewonnenen Ergebnisse gezeigt. Diese Ausführungen schließen mit einer Zusammenfassung und bieten einen Ausblick.

2. A Large Ion Collider Experiment

2.1. Large Hadron Collider

Der *Large Hadron Collider* (LHC) ist mit 14 TeV maximaler Schwerpunktenenergie in Proton-Proton-Kollisionen der zur Zeit leistungsstärkste und mit einem Umfang von 27 km gleichzeitig der größte Ringbeschleuniger auf der Welt. Diese Anlage wird vom CERN betrieben.

Das Akronym CERN steht für *Conseil Européen pour la Recherche Nucléaire*, zu deutsch *Europäischer Rat für Kernforschung*. Das CERN, gegründet im Jahr 1954, mit Sitz in Meyrin im schweizer Kanton Genf, ist das derzeit größte Forschungszentrum für Teilchenphysik auf der Welt und kann 22 Staaten zu seinen Mitgliedern zählen [CERN18]. Einige der wichtigsten Entdeckungen der Teilchenphysik wurden am CERN gemacht, darunter beispielsweise das Higgs-Boson im Jahr 2012 und Pentaquarks im Jahr 2015.

Mithilfe des LHC werden am CERN unter anderem in den aktuell vier großen Experimenten ALICE, ATLAS, CMS und LHCb, Kollisionen von Protonen, Blei- und Xenonkernen hervorgerufen. Die für diesen Zweck erzeugten Ionen durchlaufen, nachdem sie erzeugt worden sind, zunächst eine Kette von Vorbeschleunigern, bevor sie in den LHC eingespeist werden (vgl.: Abb. 2.1). Der LHC nimmt die Kerne als Ionenbündel, sogenannte *Bunches*, in Empfang und beschleunigt sie in zwei voneinander getrennten Strahlrohren in zueinander entgegengesetzten Richtungen bis sie eine Endgeschwindigkeit von 99,9999% der Vakuumlichtgeschwindigkeit c_0 erreicht haben. Um möglichst effizient arbeiten zu können, ist der LHC aus supraleitenden Magneten innerhalb von acht geraden und acht gebogenen Segmenten aufgebaut [JINST08I]. Das bedeutet, nur an wenigen Stellen im Beschleuniger werden die Ionenbündel auf eine Kreisbahn gezwungen. Auf den geraden Teilstrecken wird (nach-)beschleunigt oder befinden sich die LHC-Experimente.

Es sind verschiedene Kollisionssysteme möglich, folgende wurden bereits umgesetzt: Proton-Proton (pp), Blei-Blei (Pb-Pb), Proton-Blei (p-Pb) und Xenon-Xenon (Xe-Xe). Bis Ende des Jahres 2018 befand sich der LHC in der *RUN 2 Period*, die seit Ende des *Long Shutdown 1* im Jahr 2015 planmäßig angelaufen war. In den Jahren von 2019 bis

2. A Large Ion Collider Experiment

2021 wird sich der Beschleuniger im *Long Shutdown 2* befinden, um im Jahr 2021 in die *Run 3 Period* zu starten. Nach dem Long Shutdown 2 wird die Rate der Blei-Blei-Kollisionen bei 50 kHz liegen [ALICE14].

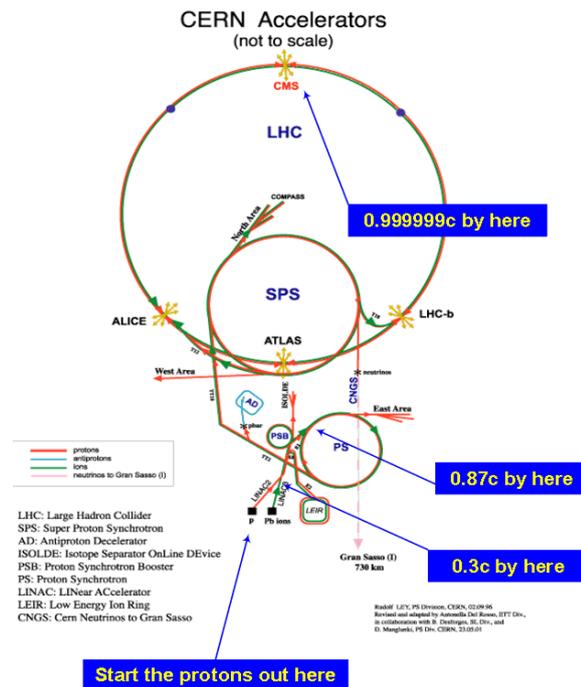


Abbildung 2.1.: Die Vorbeschleunigerkette und der LHC am CERN. Nach Erzeugung werden die Ionen mithilfe von kurzen Linearbeschleunigern, den *LINACs* zum *Proton Synchrotron Booster* hin befördert. Von diesem aus werden sie nach und nach im *Proton Synchrotron* und auf der nächsten Stufe im *Super Proton Synchrotron* weiter beschleunigt, bevor sie in den LHC eingespeist werden [LMO05].

2.2. Das ALICE Detektorsystem

A Large Ion Collider Experiment, kurz ALICE, gehört zu den vier zur Zeit größten Experimenten, die an den LHC angebunden sind. Der hauptsächliche Zweck dieses Experimentes besteht darin, das Quark-Gluon Plasma (QGP), genau zu erforschen. Daher ist dieses Experiment auf die Untersuchung von zentralen Pb-Pb-Kollisionen optimiert. Zum Quark-Gluon Plasma siehe Abschnitt 3.1 des folgenden Kapitels.

Der experimentelle Apparat an sich ist eine Zusammenstellung mehrerer Teildetektoren, die überwiegend innerhalb eines Solenoidmagneten und zwiebelschalenförmig um das Zentrum des Experiments angeordnet sind, in welchem die Teilchenkollisionen stattfinden. Die Detektoren, auf die das nicht zutrifft, befinden sich innerhalb oder außerhalb des Solenoids in modularer Form angebracht. Der Solenoid, den die ALICE Kollaboration von dem Vorgängerexperiment *L3* übernommen hat, erzeugt ein Magnetfeld der Stärke 0.5 T. Die Teildetektoren innerhalb des Magneten werden auch zusammenfassend als *Central Barrel* bezeichnet. Dies umfasst das *Inner Tracking System* (ITS), die *Time Projection Chamber* (TPC), den *Transition Radiation Detector* (TRD), den *Time Of Flight Detector* (TOF), den *High Momentum Particle Identification Detector* (HMPID) sowie die drei Kalorimeter *Electromagnetic Calorimeter* (EMCal), *Di-Jet Calorimeter* (DCal) und *Photon Spectrometer* (PHOS). Davon haben ITS, TPC, TRD und TOF eine volle azimuthale Akzeptanz, während EMCal, DCal, PHOS und HMPID diese nur teilweise abdecken. TRD und TOF decken eine Pseudorapidität von $-0.9 < \eta < 0.9$, d.h. ca 44.2° des Polarwinkels ab. Die TPC deckt diesen Winkel ebenfalls um mindestens denselben Betrag ab, in manchen Fällen sogar um einen größeren Betrag. Die Abdeckung in η durch die Detektoren HMPID, EMCAL, PHOS und DCal fällt wesentlich kleiner aus. Das ITS dient dazu, den Kollisionsort der Ionenstrahlen im Experiment sehr genau zu bestimmen sowie Trajektorien von Teilchen mit kleinem Impuls zu identifizieren und zu rekonstruieren. In der TPC ionisieren geladene Teilchen beim Durchqueren das Detektororgan. Die dabei entstehenden Elektronen werden per Gasverstärkung vervielfacht und daraufhin ausgelesen. Daher können mithilfe der TPC die Teilchenspur, der Teilchenimpuls sowie die Teilchensorte bestimmt werden. Detailliertere Informationen zur TPC befinden sich im Abschnitt 2.4. Der TRD besteht aus vielen Subdetektoren und wird zur Teilchenidentifikation benutzt. Dazu wird die *Übergangsstrahlung*, die ein Teilchen beim Verlassen eines Mediums und Eintreten in ein anderes Medium verursacht, gemessen. Im TOF wird die Flugzeit geladener Teilchen vermessen. Wird die TOF-Messung mit den Messergebnissen der Tracking-Detektoren kombiniert, so kann man die Masse eines detektierten Teilchens bestimmen. Die Kalorimeter EMCal, DCal und PHOS messen

2. A Large Ion Collider Experiment

die Energie von Elektronen, Positronen, Hadronen und Photonen. Das EMCal misst auf diesem Wege vor allem Jets, da solche in Elektronen, Positronen und Photonen zerfallen und daraus wieder rekonstruierbar sind. Zusammen mit dem zum EMCal in 180° positionierten DCal werden in ALICE Events mit zwei entstehenden Jets vermessen, wovon jedes dieser zwei Kalorimeter einen Jet auf dieselbe Art vermisst. HMPID ist in der Lage sehr schnelle Teilchen per *Cherenkovstrahlung* zu identifizieren. Das PHOS ist spezialisiert auf die Messung neutraler Pi-Mesonen und Photon-Jet-Korrelationen [JINST08II]. Weitere kleine Detektoren, wie T0, V0, FMD, etc. übernehmen in ALICE verschiedene Aufgaben, beispielsweise werden sie als *Trigger* eingesetzt. Zur Erfassung der kosmischen Höhenstrahlung wird eine Reihe von Szintillatoren benutzt (ACORDE), die außen an der Oberseite des Solenoidmagneten angebracht worden sind. Darüber hinaus gibt es bei ALICE noch einen großen, einseitig angebrachten Detektor speziell für Myonen, den sogenannten Myonenarm [ALICE08].

Für die grafische Darstellung des oben beschriebenen Aufbaus des ALICE Experiments siehe Abb. 2.2.

THE ALICE DETECTOR

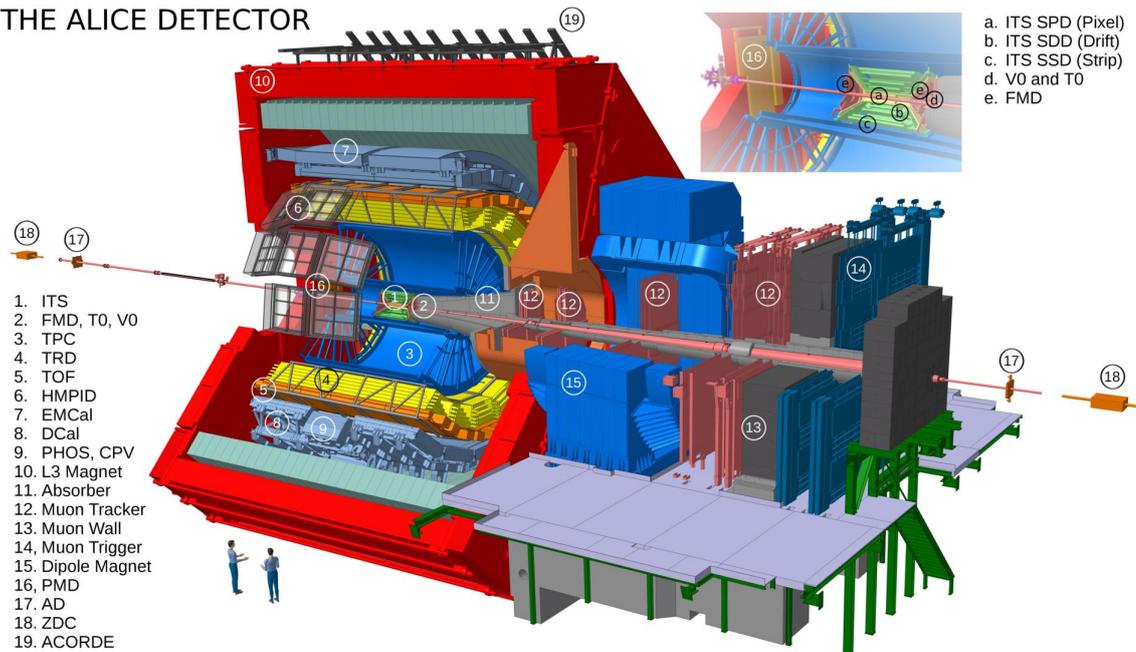


Abbildung 2.2.: Skizzierter Aufbau des ALICE Experiments in der RUN 2 Period und zwei durchschnittlich große Erwachsene am unteren Ende des Experiments zwecks Größenvergleich [ALICE17].

2.3. Time Projection Chamber

Die *Spurendriftkammer*, wie die Time Projection Chamber auf deutsch genannt wird, des ALICE Experiments ist dessen wichtigster Detektor zur Spuren- und Teilchenidentifikation im Central Barrel und der aktuell größte betriebene Detektor dieser Art. Es handelt sich um einen großen mit Gas gefüllten Zylinder mit den Maßen von 5 m in zur Strahlachse paralleler Richtung und $0.85\text{ m} < r < 2.74\text{ m}$ in radialer Richtung, woraus sich ein Gesamtvolumen von ca. 90 m^3 ergibt. Bisher wurde dieser Detektor mit Ne-CO₂-N₂ (90-10-5) von Start des Experiments bis 2010, mit Ne-CO₂ (90-10) von 2011 bis 2014, mit Ar-CO₂ (88-12) von 2015 bis 2016, im Jahr 2017 wiederum mit Ne-CO₂ (90-10) und im letzten Jahr der Run 2 Period wiederum mit Ar-CO₂ (88-12) betrieben. In der zukünftigen RUN 3 Period wird erneut Ne-CO₂-N₂ (90-10-5) als Detektorgas benutzt werden. Die Spuridentifikation findet dementsprechend anhand des Energieverlustes in dem eingesetzten Gas statt [NIMA10].

Die Auslese der TPC basierte bis Ende des Jahres 2018 noch auf *Vieldrahtproportional-kammern*. Sie sind zusammen mit einer segmentierten Kathodenebene (Padplane) der Hauptbestandteil jeder dieser Auslesekammern, da mit deren Hilfe die Gasverstärkung vorgenommen wird. Eine Drahtebene fungiert zudem als Anode für die Elektronendrift. Der Gegenpol zur Anodendrahtebene ist eine Hochspannungselektrode, die das Volumen der TPC parallel zu den Ausleseebenen in zwei Hälften teilt. An ihr liegen 100 kV Spannung an. Durch einen Feldkäfig wird das elektrische Driftfeld, welches parallel zum Magnetfeld des Solenoiden ausgerichtet ist, homogen bei einer Feldstärke von 400 V/cm gehalten. Die Padplanes sind eine Ebene aus kleinen Kupferplättchen, die jedes eintreffende Elektron registrieren.

Es gibt zwei leicht unterschiedliche Typen von Auslesekammern der ALICE TPC, die *Inner Readout Chamber* (IROC) und die *Outer Readout Chamber* (OROC). Zusammen bilden jeweils eine IROC und eine OROC einen trapezförmigen Sektor des Auslesebereiches an den beiden kreisförmigen Seitenflächen der TPC. Es gibt insgesamt 36 solcher Sektoren, jeweils 18 pro Seite, die eine Gesamtfläche von 32.5 m^2 einnehmen. In Abb. 2.3 findet sich eine Skizze der TPC.

Durchquert ein geladenes Teilchen die TPC, ionisiert es die Gasatome entlang seiner Bahn. Die dabei entstehenden Elektronen driften dann bis zu 2,5 m zu den Auslesekammern hin, wofür ein Elektron maximal $97\text{ }\mu\text{s}$ [HEL15] benötigt. Sie werden in den Kammern vervielfacht, sodass ein klares, starkes Messsignal entsteht. Im Rahmen der Gasverstärkung entstehen in den Auslesekammern genau so viele positiv geladene Ionen wie Elektronen. Diese werden aber durch das anliegende elektrische Driftfeld in Richtung der Driftkathode in Zentrumsebene der TPC hinbewegt und würden infolgedessen das

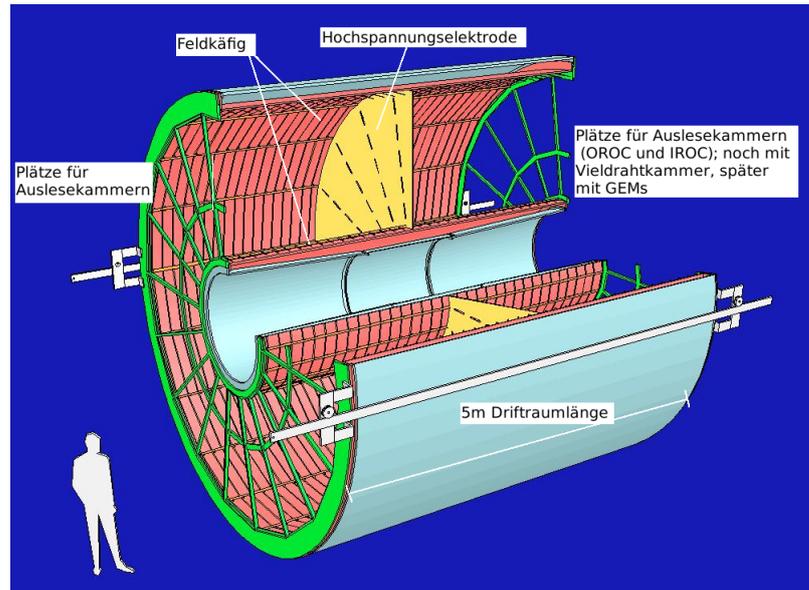


Abbildung 2.3.: Skizze der ALICE TPC ohne Auslekammern, erweitert um Kennzeichnung wichtiger Bauelemente und der Maße [GSI03].

homogen gehaltene Driftfeld lokal durch ihre Ladung (zer-)stören. Daher besteht die Notwendigkeit eine Barriere an dem Eingang der Auslekammern zu verwenden, weshalb sich ein sogenanntes *Gating Grid* dort befindet. Dies soll die Ionen, die es bis zum Kammereingang zurück geschafft haben, aufhalten. Dazu wird es per Trigger $6.5 \mu\text{s}$, nachdem eine Kollision stattfand für die Maximaldriftzeit der Elektronen bis in die Kammern, geöffnet und anschließend wieder in den geschlossenen Zustand versetzt. Geschlossen ist es undurchlässig für alle Ladungsträger, das heißt es fängt und transportiert diese ab. Daraus ergibt sich eine von der Gaswahl abhängige Totzeit dieses Teilchendetektors, die der maximalen Driftzeit der positiven Ionen in den Auslekammern zum Gating Grid entspricht.

Die ALICE TPC arbeitet optimiert für den Einsatz in einem LHC-Experiment, was bedeutet, dass sie die Detektion von bis zu 20000 geladenen Teilchen aus einer einzelnen Blei-Blei-Kollision schafft [NIMA10]. Jede dieser Spuren wird orts- und zeitaufgelöst mit einer Genauigkeit von einigen hundert Mikrometern vermessen [TCLAE09], sowie der teilchenspezifische Energieverlust pro Wegstrecke im Detektorgas, das sogenannte dE/dx , des Teilchens zu der jeweiligen Spur bestimmt.

3. ALICE TPC Upgrade

3.1. Erneuerung der Ausleseammern

Die Totzeit der ALICE TPC begrenzt durch ihr aktuelles Aufbauschema die maximale Triggerrate, mit der im gesamten Experiment gemessen werden kann. Bei der Verwendung von Ne-CO₂-N₂ (90-10-5) und ebenso bei Ne-CO₂ (90-10) muss das Gating Grid 200 μ s (siehe [HEL15]) geschlossen bleiben, um alle Ionen vom Eindringen in das Driftvolumen abzuhalten. Es ergibt sich daher eine Gesamtdauer zwischen zwei Events von 297 μ s, womit sich eine maximale Triggerrate von knapp unter 3,4 kHz ergibt. In Ar-CO₂ (88-12) benötigen die Ionen bis zu 400 μ s, um zu dem Gating Grid zu gelangen (siehe [HEL15]), während Elektronen nach der gleichen Driftzeit wie in Ne-CO₂ (90-10) aus dem Driftvolumen in den Ausleseammern eintreffen. Daraus folgt eine auf knapp oberhalb von 2 kHz beschränkte Triggerrate bei dieser Wahl des Detektorgases.

Im Long Shutdown 2 findet ein Upgrade des LHC zur Erhöhung seiner Luminosität statt. Nach diesem wird der Beschleuniger eine Kollisionsrate von 50 kHz in Pb-Pb erreichen. Um die Rate vollständig aufnehmen zu können, wird die TPC während des Long Shutdown 2 ebenfalls aufgerüstet. Bei der Maßnahme werden die Vieldrahtproportionalammern, durch auf *Gas Electron Multiplier* (GEM) basierende Ausleseammern ersetzt. Aus der getriggerten Datennahme der ALICE TPC wird in diesem Zuge eine kontinuierliche Datennahme.

Eine GEM besteht aus einer wenige Mikrometer dicken, mit Löchern von einigen Mikrometern Durchmesser versehenen Kaptonfolie, auf die beidseitig Kupfer aufgetragen ist. Die Kupferschichten dienen als Elektroden. Wird ausreichend viel Spannung an den Elektroden angelegt, entstehen hohe Feldstärken innerhalb der Löcher einer GEM, so dass dort Gasverstärkung stattfindet. Werden mehrere GEMs in zueinander paralleler Anordnung mit Spannung versorgt, bilden sich zudem Felder zwischen ihnen aus, die Ladungsträger transportieren.

Die Kammern der ALICE TPC für die Run-3-Betriebsperiode beinhalten einen Stack aus vier parallel liegenden GEMs, wie sie in Abb. 3.1 zu sehen sind. Mit dieser Anordnung und gleichzeitiger geeigneter Wahl von Feldstärken innerhalb der Transferbereiche

sowie von GEMspannungen besteht die Möglichkeit den Rückstrom der Ionen in das Driftvolumen auf unter 1% zu beschränken (vergleiche [ALICE14]).

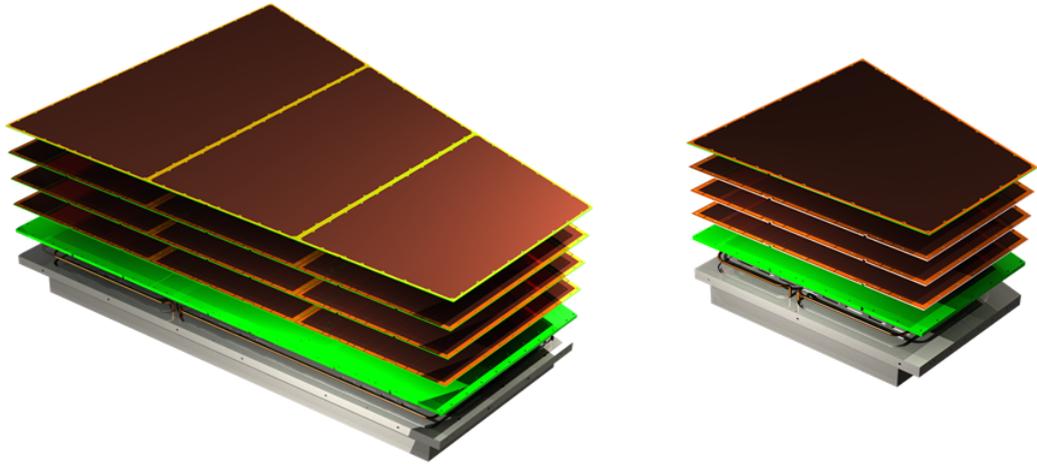


Abbildung 3.1.: Explosivdarstellung der Ausleseammern IROC (rechts) und OROC (links) der ALICE TPC im RUN 3 [HA17].

3.2. Erneuerung der Ausleseelektronik

Dieses Upgrade erfordert ebenfalls eine Erneuerung der Ausleseelektronik. Das hat einerseits den Grund, dass die Polarität des Signals, das an den Pads aufgenommen wird, bei den neuen Ausleseammern eine negative statt einer positiven Polarität hat. Andererseits müssen die gemessenen Daten schneller und in größerer Menge als von der zuvor verwendeten Elektronik verarbeitet und gespeichert werden können. Deshalb wurde eine neue Version der *Front-End Card* (FEC) designed. Die FECs enthalten den gesamten Teil der Auslekette, der für Signalverstärkung, -formung, Digitalisierung sowie digitaler Weiterverarbeitung und Puffern zuständig ist [ALICE14]. Die zentralen Bauelemente einer FEC sind deren fünf Chips, die SAMPAs genannt werden. Diese lesen jeweils 32 Kanäle aus. Ein Kanal verarbeitet dabei das Signal von genau einem Pad und leitet es weiter.

Die erste Stufe des einzelnen SAMPAs bildet ein ladungssensitiver Vorverstärker zusammen mit einem *Signal Shaper*. Der Signal Shaper formt das Signal des Vorverstärkers zu einem Puls mit einer geeigneten zeitlichen Breite (ca. 200 ns).

SAMPAs beinhalten des Weiteren jeweils einen *Analogue To Digital Converter* (ADC). Der ADC wandelt das analoge Messsignal in ein digitales Messsignal um.

Ein Messsignal hat nach Verarbeitung im SAMPA die Form einer *Gamma-4-Funktion*, die in Abb. 3.2 zu sehen ist. Die Gleichung dieser Funktion lautet

$$S(t) = A * e^4 * e^{(-4 * \frac{t-t_0}{P})} * \left(\frac{t-t_0}{P}\right)^4 . \quad (3.1)$$

S ist steht für das verarbeitete Signal, t die gemessene Zeit des momentanen Eingangssignals, A die Amplitude des eingehenden Signals, t_0 die gemessene Zeit, ab der eine Teilchenspür registriert worden ist und P steht für die *Peaking Time*.

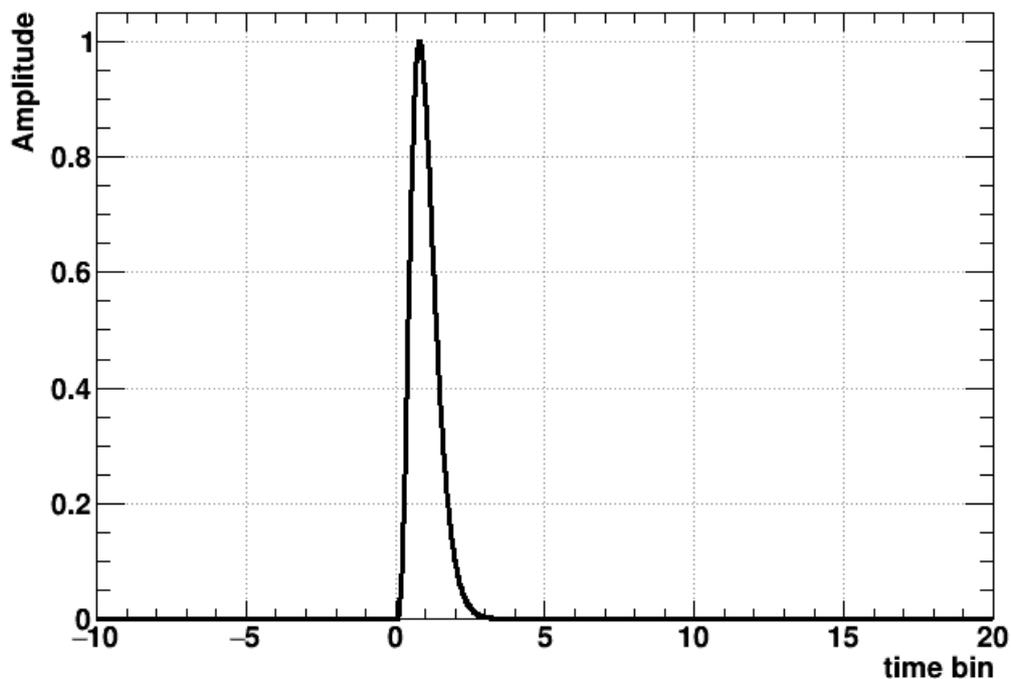


Abbildung 3.2.: Gamma-4-Funktion; Das Ausgangsbesignal eines SAMPAs weist als Ideal diese Form auf.

Darüber hinaus ist eine FEC mit zwei Chips ausgestattet, von denen jeder die Kanäle von 2.5 SAMPAs mittels optischer Links mit der weiteren Ausleselogik verknüpft. Der erste dieser beiden Chips einer FEC ist ebenfalls die Schnittstelle für die Kommunikation mit der gesamten FEC, insbesondere, um diese konfigurieren zu können [ALICE14].

3.3. Betrieb der neuen TPC Auslese

Die für den Run 3 umgerüsteten Kammern der ALICE TPC werden bei einem Gain von 2000 betrieben. Das bedeutet, dass pro einlaufendem Elektron in den Ausleseammern 2000 Elektronen erzeugt werden. Für die neue Elektronik gilt dieselbe Anforderung an das Signal-zu-Rauschen-Verhältnis, wie für die mit dem Vi drahtkammersystem zusammen eingesetzte [ALICE14]. Diese Vorgabe wird eingehalten, wenn der Signaluntergrund $670e$ beträgt [ALICE14], wobei e die Elementarladung ist. Das bedeutet, der Untergrund entspricht 670 auf der Padebene auftreffenden Elektronen. Dies entspricht im Design der neuen FECs einem maximalen Noise von einem ADC.

Ferner soll während des Betriebs der neuen Auslese weniger als ein Prozent der durch Gasverstärkung entstehenden Ionen aus den Kammern in das Driftvolumen der TPC gelangen. Gleichzeitig soll eine Energieauflösung von zwölf Prozent oder besser gewährleistet werden.

Mit dieser neuen Auslesemethode und den neuen Detektorkomponenten ergibt sich neben neuen Möglichkeiten auch ein geändertes Arbeitsverhalten, das es zunächst zu untersuchen gilt. Hierzu zählen vor allem das Noise- und Pedestalverhalten der Elektronik, auf das in dieser Arbeit noch eingegangen wird, das Arbeitsverhalten bezüglich der Spuridentifizierung und des Auflösungsvermögens des dE/dx der neuen Auslesekomponenten. Ebenso umfasst das die Quantifizierung und das Arbeitsverhalten hinsichtlich des *Common Mode Effects* bei den Auslesekomponenten, auf das ebenfalls im Rahmen dieser Arbeit eingegangen wird.

Für Informationen zu Pedestals und Noise bzw. über den Common Mode Effect wird auf das Kapitel 3 verwiesen.

4. Physikalischer Hintergrund

4.1. Quark-Gluon Plasma - Mithilfe von ALICE untersuchte Physik

Das *Quark-Gluon Plasma* (QGP) ist ein subatomarer Materiezustand, in welchem Teilchen, die *Quarks* und *Gluonen* genannt werden, nahezu frei präsent sind. Ein solches QGP lag schon in den ersten Augenblicken des Universums nach seinem Entstehen sehr kurze Zeit nach dem Urknall vor.

Quarks sind Teilchen, die unter anderem die Kernbausteine Proton und Neutron zusammensetzen. Sie sind nach dem heutigen Kenntnisstand der Physik elementar, d.h. sie haben keine eigene Substruktur und sind Teilchen ohne räumliche Ausdehnung, also punktförmig. Gebunden werden diese Teilchen durch die sogenannte *starke Wechselwirkung*, deren gebundene Zustände aus mehreren Quarks als Hadronen bezeichnet werden. Um von der starken Wechselwirkung beeinflusst werden zu können, müssen Teilchen eine *Farbladung* besitzen, wovon es jeweils drei verschiedene für Teilchen bzw. Anti-Teilchen gibt: Blau, Grün, Rot bzw. Anti-Blau, Anti-Grün und Anti-Rot. Gluonen als Vermittler der starken Wechselwirkung tragen ihrerseits eine Kombination aus einer Farbe und einer Anti-Farbe, wovon insgesamt acht möglich sind. Die aus Quarks und Gluonen oder sogar nur Gluonen zusammengesetzten Teilchen weisen diese Farbladung nicht mehr auf, sie sind farblich neutral.

Es gibt sechs verschiedene Sorten Quarks, die man als *Quark Flavour* bezeichnet. Das sind Up, Down, Strange, Charm, Top und Bottom. Diese sechs Flavour werden zusammen mit der starken Wechselwirkung, die durch ihr Austauschteilchen, das Gluon repräsentiert wird, mit sechs verschiedenen *Leptonen Flavours*, dem *Higgs Boson* und den weiteren Wechselwirkungen der Natur, ausgenommen der Gravitation im *Standardmodell der Teilchenphysik* zusammengefasst, welches in Abb. 4.1 zu sehen ist.

Es wurden in vielen Experimenten und bei wiederholtem Durchführen dieser bisher keine freien, farblich geladenen Teilchen beobachtet. Es wird daher empirisch daraus geschlossen, dass Teilchen, die eine Farbladung tragen nicht ungebunden in der Natur vorkom-

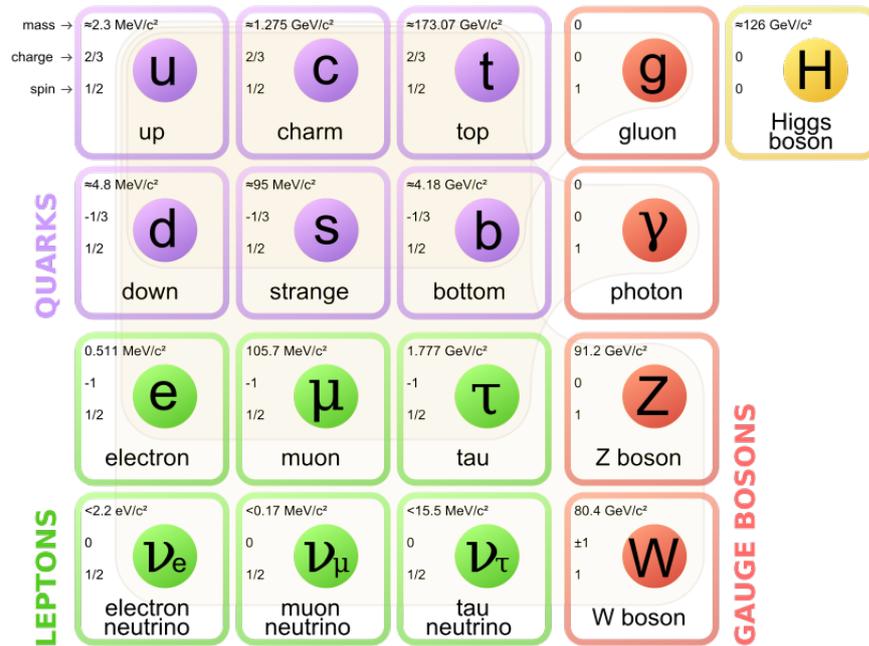


Abbildung 4.1.: Das Standardmodell der Teilchenphysik [PO17].

men können. Eine plausible Erklärung dafür findet sich im Verhalten des Potentials der starken Wechselwirkung:

$$V_s = \frac{4}{3} \frac{\alpha_s \hbar c}{r} + kr. \quad (4.1)$$

Dieses erhöht sich linear mit dem Abstand zwischen gebundenen Trägern von Farbladung (siehe dazu Abb. 4.2). Die $\frac{1}{3}$ im Vorfaktor ergeben sich dadurch, dass ein Quark eine aus drei mögliche Farben tragen kann, α_s ist die Kopplungskonstante der starken Wechselwirkung, r die Variable für den Abstand und k eine Konstante für den Teil, der den linearen Teil dieses Potentials beschreibt. Die Naturkonstanten \hbar und c sind das reduzierte Planck'sche Wirkungsquantum bzw. die Lichtgeschwindigkeit.

Aus dieser Grundlage ergeben sich zwei verschiedene Wege, die betreffenden Teilchen in einen quasi freien Zustand zu versetzen: Zum einen können Kerne in einem definierten Raumvolumen so eng zusammengebracht werden, d.h. ihre Raumdichte wird soweit erhöht, dass sie überlappen und deren Nukleonen nicht mehr eindeutig zum zugehörigen Kern zuzuordnen sind. Die Konstituenten dieser Nukleonen sind dann in der Lage sich in diesem Volumen frei zu bewegen. Dieses Phänomen tritt ab einer Kerndichte

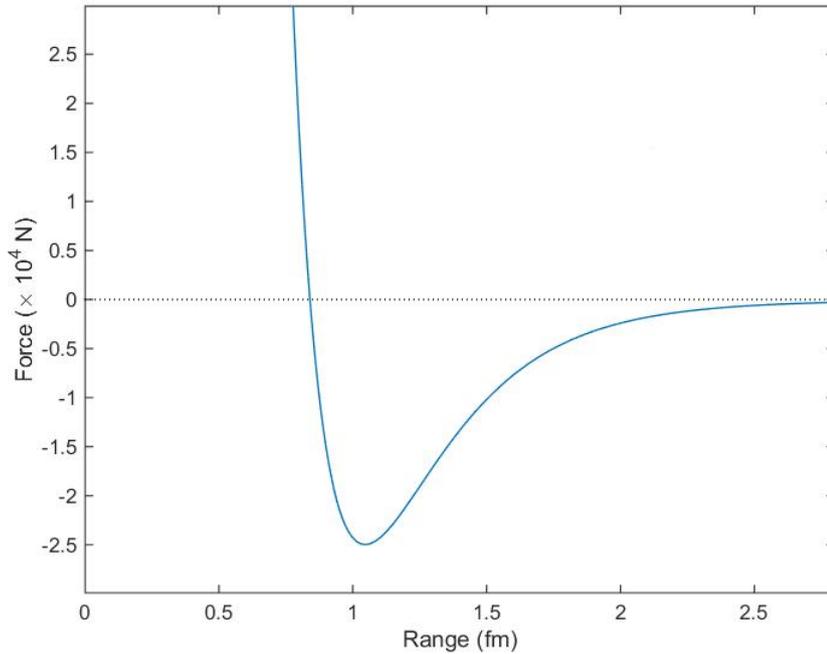


Abbildung 4.2.: Das Potential der starken Wechselwirkung in Abhängigkeit vom Abstand der Wechselwirkungspartner zueinander [WKW18].

auf, die der zehnfachen derer im Normalzustand entspricht [PRSZ09]. Zum anderen ist es möglich die Energie eines Systems, oder auch nur eines einzelnen Kerns, soweit zu erhöhen, dass bei den Wechselwirkungen der Nukleonen untereinander Pionerzeugung einsetzt. Durch ständige Erzeugung weiterer Hadronen steigt die Dichte der Teilchen, die aus Quarks und Gluonen aufgebaut sind, weiter an und darüberhinaus nimmt die Dynamik der Teilchen weiter zu. Ab einem gewissen Punkt kann die Zugehörigkeit einzelner Konstituenten zum jeweiligen Hadron nicht mehr festgestellt werden; diese liegen dann vermischt vor, es ist ein QGP entstanden [PRSZ09]. Dieser Vorgang beginnt ab einer Energiezufuhr von etwa 150 MeV. In der Praxis wird, je nach Art des Experiments (*Collider-* oder *Fixed-Target-Experiment*), einer dieser Wege wesentlich mehr verfolgt, als der jeweils andere, aber auch eine Kombination beider Möglichkeiten wird genutzt. In Abb. 4.3, in der das Phasendiagramm der Kernmaterie dargestellt ist, ist dies gut zu erkennen. Auf der x-Achse findet man die Kerndichte als relative Größe zur Kerndichte im Normalzustand, auf der y-Achse die Temperatur, also die kinetische Energie, die im betrachteten System steckt, in Einheiten von MeV. Ein unbeeinflusster Kern befindet

sich bei Normalbedingungen am Dichtepunkt ρ_0 . Der weiß hinterlegte Bereich in der linken Hälfte der Abb 4.3 wird als Hadronengas bezeichnet, mit Ausnahme des Punktes mit den Koordinaten $(1|0)$, dem Ausgangspunkt. Der orange markierte Bereich im Diagramm entspricht dem Bereich, in dem die Kernmaterie in Form eines QGPs vorliegt. Je nach Weg von Hadronengas zu einem QGP ist der Übergangsbereich (im Diagramm gelb markiert) unterschiedlich groß. Die Pfeile stellen die Wege der Beschleuniger und damit direkt den ihrer Experimente dar, die in die Phase des QGP genommen werden. Der kurze Pfeil am linken Rand des Diagramms in Abb. 4.3, der nach unten orientiert ist, gibt den Weg an, den das frühe Universum aus dem QGP heraus genommen hat.

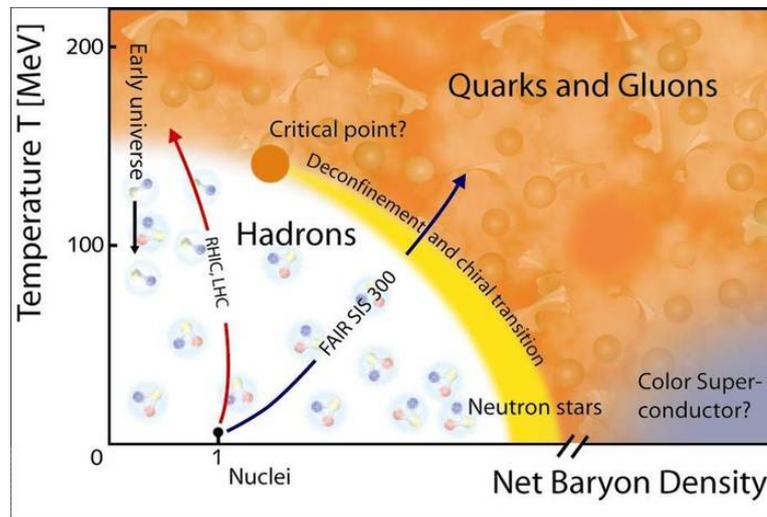


Abbildung 4.3.: Phasendiagramm von Kernmaterie [StWDP10].

Der LHC nutzt Kollisionen von Bleiionen, um ein QGP zu erzeugen, ALICE ist somit ein Collider-Experiment.

Ein QGP ist im Experiment nicht direkt untersuchbar. Daher ist es notwendig eine oder mehrere Methoden zu nutzen, um die Eigenschaften eines QGPs auf indirektem Weg erforschen zu können. Beim ALICE Experiment eignet sich dafür besonders die Sondierung der Materie, von der erwartet wird, dass sie sich im QGP Zustand befindet per Quarks und Gluonen aus den harten Streuprozessen der Pb-Pb-Kollisionen. Vor allem werden die Methode der *Jet-Tomographie* und die Methode des Vergleichs der Produktion von angeregten *Quarkoniazuständen* oder solchen im Grundzustand bei Blei-Blei-Kollisionen zu der Produktion eben dieser in Proton-Proton-Kollisionen-genutzt. Erstere Methode beruht darauf, dass im QGP farblich geladene Teilchen durch Wechselwirkung

Energie verlieren. Das geschieht auf eine, der Bremsstrahlung geladener Teilchen in Materie, ähnliche Weise. Die so abgestrahlte Energie wird von den vielen von der Kollision hervorgebrachten aufgenommen. Aus dem Energieverlust selbst können Informationen darüber abgeleitet werden, was bei der Kollision entstanden ist. Aus dem Vergleich von Transversalimpulsspektren aus Pb-Pb und pp wird dieser Energieverlust deutlich, da in pp-Kollisionen dieser Effekt nicht auftritt. [BRTPJ12]

Bei zweiterer Methode wird verglichen, wie viele Quarkoniazustände in Pb-Pb produziert worden sind und wie die Anzahl derer, die in pp produziert worden sind, ist. Quarkonia nennt man Teilchen, deren Inhalt zwei Quarks bilden, wovon eins einen beliebigen Flavour und das andere genau den dazugehörigen Anti-Flavour besitzt. Es wird eine Unterdrückung der Quarkoniaproduktion in Anwesenheit eines QGPs erwartet, da die freien Farbladungen darin das Potential zwischen Quark und Anti-Quark reduzieren. Bei angeregten Quarkoniazuständen ist der Abstand zwischen den Bindungspartner größer, sodass das QGP dieses Potential stärker reduziert und solche Zustände noch seltener vorkommen. [BRTPJ12]

4.2. Pedestals und Noise - physikalisch-technischer Aspekt des neuen TPC Auslesehammermodells

Pedestal allgemein bezeichnet einen für Messinstrumente und Messsysteme in der Regel festen Basismesswert, der sich aufgrund der Instrumentenbauweise bzw. die genutzten Komponenten eines Aufbaus ergibt. Dieser Basismesswert kann als geräte- bzw. systemspezifischer Wert Null verstanden werden. Gibt es mehrere unabhängige Messkanäle in einer Messeinheit, hat jeder dieser Kanäle einen eigenen Pedestal-Wert. Kontinuierliche Schwankungen um einen Pedestal-Wert herum werden als Noise bezeichnet. Neben vielen externen Faktoren, die solches Schwanken verursachen, passiert dies auch aufgrund einer gewissen Instabilität eines gemessenen Wertes, verursacht durch die Beschaffenheit des Messgeräts selbst.

Handelt es sich um elektronische Messeinheiten, wie es beispielsweise bei der Auslese der ALICE TPC der Fall ist, entspricht Noise dem elektronischen Rauschen. Noise von mehreren unabhängigen Messkanälen unterscheidet sich ebenfalls voneinander.

Bezüglich der ALICE TPC richten sich Pedestals und Noise der gesamten Auslese insbesondere nach den Werten der Ausleseelektronik der FECs. Da jedes Pad der TPC über einen eigenen Kanal ausgelesen wird, ergeben sich eine ganze Reihe Pedestal- und Noise-Werte. Die Designanforderung an die Front-End Cards für das TPC Upgrade ist, dass

der Noise bei maximal einem ADC Wert liegt.

Für Messungen bedeuten Pedestals und Noise, dass Messwerte verändert werden. Sind die Werte der Pedestals und des Noise bekannt, können also einerseits Korrekturen an der Auslesehardware vorgenommen werden, falls das Verhalten dieser noch nicht den Anforderungen entspricht. Andererseits ist es möglich bei den im RUN genommenen Daten Korrekturen vorzunehmen, sodass die Messungen des ALICE Experimentes noch aussagekräftiger werden.

4.3. Common Mode Effect - physikalischer Aspekt des neuen TPC Auslesekommermodells

Bei dem Common Mode Effect handelt es sich um ein Phänomen, das in den zukünftigen, GEM-basierten Auslesekommer der ALICE TPC aufgrund einer kapazitiven Kopplung auftritt, welche durch die Padebene und die Unterseite der unteren GEM gebildet wird. Diese sind parallel zueinander liegende elektrisch leitende Ebenen, zwischen denen eine fest gewählte Potentialdifferenz und daher ein elektrisches Feld liegt. Diese Anordnung entspricht einem geladenem Plattenkondensator, in dem Padplane und die angesprochene GEM-Elektrode die Kondensatorplatten darstellen. Die Padplane liegt auf Erdpotential, an der GEM liegt eine Spannung an. Eine grafische Darstellung dieser Anordnung findet sich in Abb. 4.4

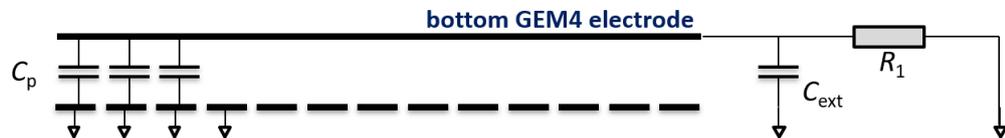


Abbildung 4.4.: Kapazitive Kopplung der unteren Elektrode der letzten GEM und der Padebene in den neuen Auslesekommer der ALICE TPC [CLu].

Für einen Plattenkondensator gilt:

$$C = \epsilon \frac{A}{d} \quad (4.2)$$

mit der Kapazität des Kondensators C , der Fläche der Kondensatorplatten A , dem Abstand beider Platten zueinander d und der Dielektrizitätskonstanten ϵ . Des Weiteren gilt für einen Kondensator allgemein:

$$C = \frac{Q}{U} \quad (4.3)$$

und

$$E = \frac{U}{d} \quad (4.4)$$

wobei E die elektrische Feldstärke, U die Potentialdifferenz und Q die elektrische Ladung im Kondensator sind. Gleichung 4.4 nach U umgestellt und in Gleichung 4.3 eingesetzt ergibt

$$C = \frac{Q}{Ed} \quad (4.5)$$

und nach Nutzen dieses Ausdrucks in Gleichung 4.2, Eliminieren der Variablen d und Umstellen nach der Ladung Q erhält man

$$Q = \epsilon AE . \quad (4.6)$$

Driftet in der oben beschriebenen Situation Ladung, zum Beispiel aus Ionisation und anschließender Verstärkung stammende Elektronen, von der letzten GEM zur Padebene, entspricht das einer Entladung dieser Kondensatoranordnung. Infolgedessen wird das elektrische Feld zwischen der GEM-Elektrode und der Padebene abgeschwächt (vgl. Gleichung 4.6). Durch den Anschluss der GEM an eine externe Spannungsquelle wird die vorherige Spannungsdifferenz bzw. Feldstärke sofort, d.h. nahezu zeitgleich zur Messung des Signals von einer Teilchenspur, wieder hergestellt, wodurch eine Ladung, dem vorausgegangenen Signal im Betrag gleich, aber umgekehrt gepolt, in den Pads influenziert wird. Diese Ladung wird dabei über die gesamte Fläche der Padebene bzw. über alle Pads einer Auslesekommer gleichverteilt (vgl. Gleichung 4.6). Bei der Ladung aufgrund von Influenz handelt es sich um das messbare Signal des Common Mode Effect. In Abb. 4.5 ist diese Messsituation gezeigt. Es wird die Zeitverteilung der aufgezeichneten Signalstärke einiger Pads dargestellt. Die zwei positiv orientierten Maxima sind echte Messsignale der TPC. In denselben Timebins der anderen Pads sind in der Grafik kleinere negative Einträge zu erkennen. Diese stammen vom Common Mode Effect.

Die mittlere Größe und das Verhalten dieses Effektes zu kennen ermöglicht letztendlich eine Korrektur der Messdaten aus dem ALICE Experiment und mehr Sicherheit hinsichtlich dieser Daten.

Common mode signal

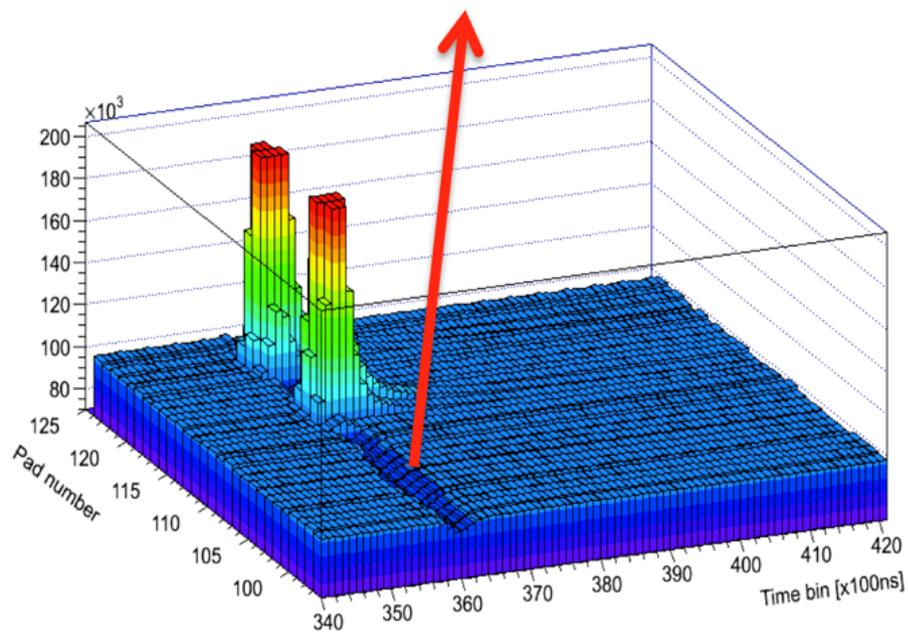


Abbildung 4.5.: Zwei wirkliche Messignale (positive z-Richtung) und Common Mode Signal (negative z-Richtung), aufgetragen in Pad- und Zeitrichtung [CLu].

5. Experimenteller Aufbau und Ablauf des Beamtests

Um das Betriebsverhalten des neuen Auslesekammertyps der ALICE TPC zu testen hat zuletzt im Mai 2017 ein Test mit einem IROC Kammerprototypen im geringen Arbeitsumfang am CERN *Proton Synchrotron* (PS) stattgefunden. Geringer Arbeitsumfang bedeutet hierbei, dass die Rate der Teilchen, die diese Kammer durchquert haben, deutlich geringer war, als sie beim Betrieb von ALICE während der RUN 3 Period sein wird.

5.1. Aufbau der Testkammer am Proton Synchrotron

Der CERN PS ist ein Ringbeschleuniger, der Ionen auf Energien bis zu 25 GeV beschleunigen kann. Beim Beamtest ist ein Teilchenstrahl aus Elektronen und Pionen benutzt worden, der als Sekundärstrahl aus Kollisionen des Protonstrahls des PS mit einem *Target* hervorging. Target bezeichnet in solchen Fällen eine Menge eines ausgewählten Mediums, die speziell für die Produktion von Sekundärteilchen durch Kollisionen eingesetzt wird. An den PS sind verschiedene Abzweigungen angeschlossen, sodass der Teilchenstrahl des Beschleunigers direkt an verschiedene Experimentierplätze in einer überirdischen Experimentierhalle auf dem CERNGelände geleitet werden kann. Der genutzte Experimentierplatz für den Kammertest war ein durch dicke Betonmauern abgegrenzter, aber nicht von der Umgebung abgeschlossener Bereich. In diesem wurde der IROC Prototyp auf einem in der Höhe verstellbaren Tisch platziert, sowie einige weitere Detektoren im Strahlengang zur Kammer. Außer der Kammer, den übrigen Detektoren und Leitungen zur Spannungs- bzw. Gasversorgung befanden sich keine weiteren Geräte in dem separierten Experimentierbereich. Die Leitungen wurden an dafür vorgesehenen Vorrichtungen aus dem Experimentierbereich herausgeführt.

Die Auslesekammer vom Typ IROC wurde beim Beamtest mit sechs FECs ausgestattet. Demzufolge sind 960 Kanäle gleichzeitig ausgelesen worden.

In Abb. 5.2 ist die IROC, ausgerüstet mit den sechs FECs, in einem Labor am CERN zu sehen.

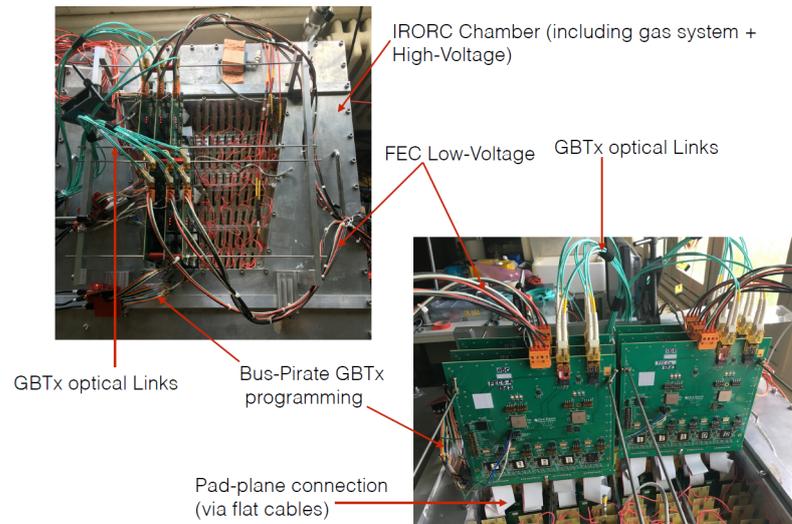


Abbildung 5.1.: Die Testkammer vom Typ IROC, ausgerüstet mit den sechs Front-End Cards für den Beamtest in einem CERN Labor vor dem Transport zum PS [TA17].

Im Laufe des Beamtests mit dem IROC Prototypen ist mit zwei verschiedene Anordnungs-konfigurationen der sechs FECs gemessen worden, da sechs dieser Karten keine komplette Kammer diesen Typs auslesen können. Der ausgelesene Teilbereich der Kammer wird als aktiver Bereich bezeichnet.

5.2. Weitere eingesetzte Detektoren

Beim Beamtest der IROC wurden zur Identifizierung der Teilchen, die den Kammerprototypen durchqueren, sowie in der Rolle eines Triggers drei weitere, von der Kammer unabhängige Detektoren verwendet. Zum einen handelte es sich dabei um einen Tscherenkow-Detektor. Mit dem können anhand des charakteristischen Lichts, das entsteht, sobald geladene Teilchen ein Medium mit einer höheren Geschwindigkeit durchqueren als der mediumsspezifischen Lichtgeschwindigkeit, Teilchensorten unterschieden werden. In den gespeicherten Messdaten geschieht die Teilchenidentifikation mittels des Wertes, den der Tscherenkow-Detektor zu den jeweiligen Teilchen gemessen hat.

Zum anderen kamen zwei Szintillatoren zum Einsatz, deren korrelierte Signale nach Durchgang eines geladenen Teilchens als Triggersignal das Speichern der Messdaten für einen Zeitraum von $5 \mu\text{s}$ auslöst.

Abb. 5.2 zeigt eine schematische Skizze dieses Aufbaus.



Abbildung 5.2.: Skizze des Aufbaus bei dem Beamtest am CERN PS.

5.3. Skizzierter Weg der Datenverarbeitung

Im Zentrum der Datennahme stand die *ReadOut Receiver Card* (RORC). Sie erhielt einen kontinuierlichen Datenstrom durch die FECs, sowie, falls Zustände gekommen war, ein Triggersignal. Das Triggersignal wiederum wurde von einem *Agilent Scope* an die RORC weitergeleitet und auf dem Weg für diese umgewandelt. Hat die RORC dieses Triggersignal erhalten, wurde der Schreibprozess der stetig erhaltenen Messdaten für einen zuvor festgelegten Zeitraum ausgelöst.

Das Agilent Scope bekam seinerseits kontinuierlich die Daten des Tscherenkow-Detektors sowie das koinzidente Triggersignal der Szintillatoren, wenn diese aktiviert wurden. Bei Eingang dieses Koinzidenzsignals sind an dieser Stelle die Tscherenkow-Messdaten herausgeschrieben worden.

5.4. Durchführung des Beamtests

Bei dem Testbeam im Mai 2017 wurden innerhalb von sieben Messtagen zu jeweils 24 Stunden Daten aus über 300 Runs gewonnen. Dies erfolgte bei verschiedenen Einstellungen sowohl was den Teilchenstrahl selbst betrifft, als auch bei der Hochspannungsversorgung der IROC bzw. der Auswahl aus verschiedenen Hochspannungsquellen, sowie beim Anordnen der Ausleseelektronik an der Padebene des Kammerprototypens. Diese

Metainformationen der Messdaten wurden in einem elektronischen Logbuch zum Beamtest, in dem sämtliche Settings, Startzeit, Typ sowie Anzahl der Events jedes Runs und das jeweils eingesetzte Hochspannungsnetzgerät festgehalten worden sind, eingetragen. Einem Analysealgorithmus ist es so später möglich von selbst auf diese Infos zuzugreifen.

Nach ersten Proberuns, bei denen vor allem die Funktionalität des Aufbaus und der Software zur Steuerung sowie die Ausrichtung der Kammer überprüft und gegebenenfalls etwas angepasst worden ist, hat die eigentliche Messphase begonnen. In dieser Phase wurden in einzelnen Runs entweder Pedestals oder rohe Messdaten aus Teilchenspurdetektionen gewonnen. Es sind üblicherweise 10000 Events pro Datarun und bis zu 1000 Events pro Pedestalarun aufgenommen worden. Ein Event stellt dabei eine Momentaufnahme dessen dar, was von der Padebene der Testkammer gemessen wird. Bei einem Datarun bedeutet das, dass zusätzliche Auslesekriterien erfüllt worden sind, d.h. der Trigger ein Signal gesendet hat, dass mindestens ein geladenes Teilchen die Testkammer durchquert. Bei Pedestalaruns ist dagegen ein dicker Materialblock, ein sogenannter *Beamstopper*, in den Strahlengang hineingefahren.

Die Daten werden dann mit einer Sampling Rate von 5 MHz über einen Zeitraum von $4\ \mu\text{s}$ aufgezeichnet. Die Zeitaufösung beträgt damit 200 ns und ein Timebin entspricht diesem Intervall. Ein Event wird demnach in 20 Timebins aufgenommen. Die Datennahme findet ohne Nullunterdrückung statt, d.h. die rohen ADC-Werte werden aufgezeichnet.

Der Energiebetrag des Sekundärstrahls wurde während der Messphase mehrere Male im Bereich von $2\ \text{GeV}/c$ bis $5\ \text{GeV}/c$ in ganzzahligen Schritten geändert. Dadurch ändern sich die Raten der Sekundärteilchen, den Elektronen und Pionen, die die Testkammer durchqueren.

Die Einstellung der Strahlenergie, das Herein- bzw. Herausfahren des Beamstoppers und das Limitieren der Anzahl der Events pro Run konnte per Computer im zur Experimentierzone gehörigen Kontrollraum vorgenommen werden. Die Steuerung des Protonstrahls selbst wird nur aus dem Kontrollraum des PS von CERN-Personal gehandhabt.

Die Hochspannungseinstellungen an den GEMelektroden sind ebenfalls mehrmals gewechselt worden. In einigen Fällen veränderte sich dabei ebenfalls gezielt der *Gain*, d.h. wie viele Elektronen in der Gasverstärkung pro Elektron aus einer Ionisation der Teilchenbahn im Gas, entstehen. Dies hatte den Zweck das Verhalten und Leistungsvermögen der neuen Auslese bei mehreren verschiedenen in Frage kommenden Einstellungen der GEMspannungen überprüfen zu können. Alle angewendeten Hochspannungskonfi-

gurationen der GEMs stammen aus vorausgehenden Messungen mit einem gesonderten, explizit für den Test von GEMs und deren Einstellungen ausgelegtem, Teststand. In denen sind alle wichtigen Parameter, wie beispielsweise der Gain, mitaufgenommen worden. Die verschiedenen Hochspannungskonfigurationen finden sich in der Tabelle in Abb. 5.3

Kennung	Driftfeld	ET1	ET2	ET3	ET4	UGEM1	UGEM2	UGEM3	UGEM4	Gain	Gerät
A	200	4000	4000	100	4000	270	230	288	359	2000	Spannungsteiler
B	400	3500	3500	100	3500	270	230	320	320	2000	Spannungsteiler
1	400	2000	4000	100	4000	250	215	332,5	332,5	2000	Netzgerät
2	400	2000	4000	100	4000	245	220	324	324	1500	Netzgerät
3	400	2000	4000	100	4000	235	240	304,5	304,5	1000	Netzgerät
4	400	2000	4000	100	4000	240	225	337	337	3000	Netzgerät
5	400	4000	2000	100	4000	225	235	304	382	200	Netzgerät
6	400	4000	2000	100	4000	255	235	292	364	2000	Netzgerät
7	400	4000	2000	100	4000	275	235	284	345	2000	Netzgerät
8	400	4000	2000	100	4000	305	235	271	339	2000	Netzgerät
9	400	4000	2000	100	4000	315	285	240	300	2000	Netzgerät
10	400	3500	3500	100	3500	270	230	320	320	2000	Netzgerät

Einheiten

Felder: V/cm

GEMs: V

Abbildung 5.3.: Hochspannungseinstellungen, die während des Beamttests bei dem GEM-stack der Testkammer angewendet worden sind.

Weitere Änderungen im HV-Bereich fanden durch den wechselnden Einsatz verschiedener Netzgeräte zur Hochspannungsversorgung des GEMstacks statt. Während des Beamttests wurden zwei Spannungsteiler, ein älteres ISEG sowie ein neueres ISEG Netzgerät und ein Modell der Firma CAEN eingesetzt.

Während der mehrtägigen Messperiode ist die Anordnung des FECs geändert worden, d.h. der aktive Bereich entsprach ab dem Zeitpunkt des Wechsels anderen Pads der IROC. Der vorherige und der neue aktive Bereich überschritten sich lediglich innerhalb weniger Pads der ersten Padreihen der Auslekammer. Auf diese Weise konnte trotz weniger zur Verfügung stehender Ausleseelektronik ein größerer Bereich der Kammer überprüft werden. Der gemeinsame Bereich beider FEC-Settings dient dabei als Refe-

5. Experimenteller Aufbau und Ablauf des Beamtests

renz zwischen ihnen.

6. Pedestals und Noise

6.1. Zielsetzung der Untersuchung

Das Ziel der ersten Analyse im Rahmen dieser Arbeit ist Mittelwerte für Pedestals und Noise des neuen ALICE TPC Auslesesystems zu erhalten und feststellen zu können, ob die Anforderung, einen maximalen Noise-Wert von einem ADC Count zu haben (siehe dazu Abschnitt 3.3), erfüllt ist. Darüber hinaus soll das zeitliche Verhalten während der gesamten Messperiode des Beamttests, die Homogenität im gesamten aktiven Bereich sowie deren Charakteristika auf der Ebene eines einzelnen Auslesepads dieser beiden Größen untersucht werden.

Abbildung 6.1 zeigt den zeitlichen Signalverlauf eines Pads während eines Pedestalsruns. Ein Fluktuieren der ADC-Werte um einen bestimmten Wert herum, der als Pedestalwert bezeichnet wird, lässt sich erkennen. Diese Fluktuationen sind der zugehörige Noise. Bei den analysierten Daten handelt es sich ausschließlich um diese, zu denen der Messvorgang im Abschnitt 5.4. beschrieben wird. Die Rohdaten, die direkt aus den Messungen stammen, werden mithilfe des *C++* basierten Softwareframeworks O^2 verarbeitet. Dabei ist die Rekonstruktion als Pedestaldaten eines Runs bzw. zu Daten aus Teilchendetektionen zu unterscheiden. Zur Analyse wurde neuer Softwarecode angelegt.

Obwohl in der Messphase dedizierte Pedestalsruns aufgezeichnet worden sind, werden in der Analyse alle verfügbaren Runs, als Pedestalsruns rekonstruiert, verwendet. Auf diese Weise steht eine größere Statistik zur Verfügung und die Ergebnisse haben eine größere Aussagekraft. An dem Vorgang der Untersuchung selbst ändert sich dadurch Nichts. Dies ist nur möglich, da die Messdaten während des Beamttests ohne Nullunterdrückung, d.h. ohne Abzug von Pedestal-Werten, aufgezeichnet worden sind.

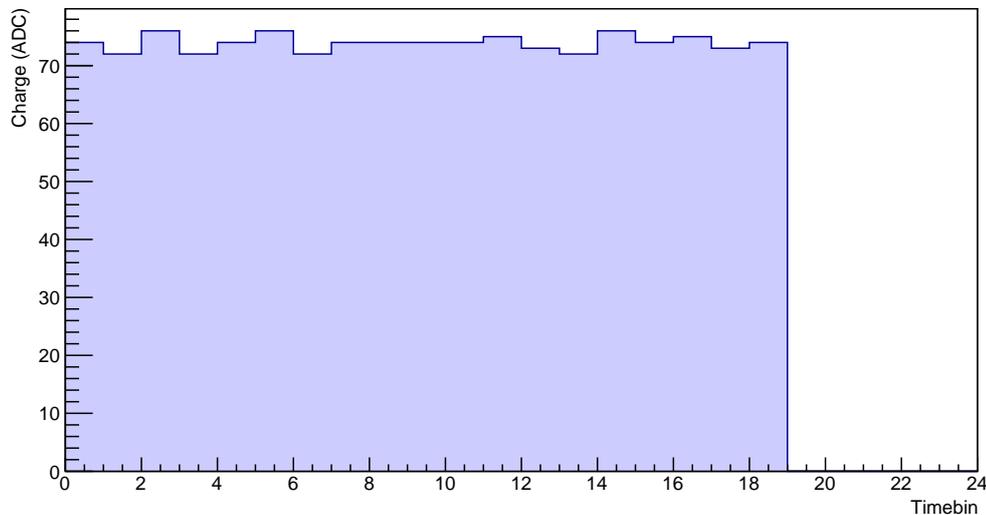


Abbildung 6.1.: Zeitlicher Signalverlauf eines einzelnen, im aktiven Bereich zentral gelegenen Pads bei einem Pedestalrun.

6.2. Vorgehen bei Untersuchung von Pedestals und Noise anhand der Testbeamdaten

Als erster Schritt dieser Untersuchung werden die Werte der Pedestals und des Noise jeweils in ein 2D-Histogramm für jeden einzelnen Run eingetragen. Auf den ersten beiden Achsen werden die Koordinaten eines Auslesepads eingetragen, d.h. die Reihennummer sowie die Padnummer innerhalb der Reihe. Die dritte Achse enthält die jeweilige Messgröße. Diese Histogramme können als Karte des aktiven Bereichs verstanden werden, auf der die untersuchten Größen ortsabhängig im aktiven Bereich zu sehen sind. Eine Markierungen in diesen Histogrammen kennzeichnet die Ränder der Bereiche, die die einzelnen FECs im gesamten aktiven Bereich abdecken (siehe dazu die Abbildungen 6.2 und 6.3).

Im nächsten Schritt wird die Häufigkeitsverteilung der einzelnen Werte beider Größen untersucht. Der Mittelwert sowie die Standardabweichung jeder Größe lassen sich für den jeweiligen Run aus diesen Verteilungen generieren. Beide Mittelwerte, wie auch beide Standardabweichungen jedes einbezogenen Runs, gegen die jeweilige Startzeit des Runs aufgetragen, geben den zeitlichen Verlauf des mittleren Pedestal-Wertes, des mittleren

6.2. Vorgehen bei Untersuchung von Pedestals und Noise anhand der Testbeamdaten

Noise sowie beider Standardabweichungen während des gesamten Beamtests wieder. Zusätzlich zeigen Markierungen die Stellen, an denen das verwendete Gerät zur Hochspannungsversorgung der GEMs ausgewechselt worden ist. Eine Änderung der Messwerte zu diesen Zeitpunkten lässt sich so einfacher mit diesen Eingriffen in Verbindung bringen. Der Rand des aktiven Bereichs weist, im Gegensatz zu dessen übrigen Anteil, höheren Noise auf (siehe die Abbildungen 6.2, 6.3 und 6.4). Daher werden die Häufigkeitsverteilungen, die Mittelwerte sowie Standardabweichungen und deren zeitliche Verläufe nur mit Messdaten der zwei mittig gelegenen der insgesamt sechs FECs gebildet. Bei diesen zwei FECs beträgt die Anzahl der Randpads lediglich neun bzw. zehn, sodass deren Einfluss durch erhöhten Noise vernachlässigbar klein wird.

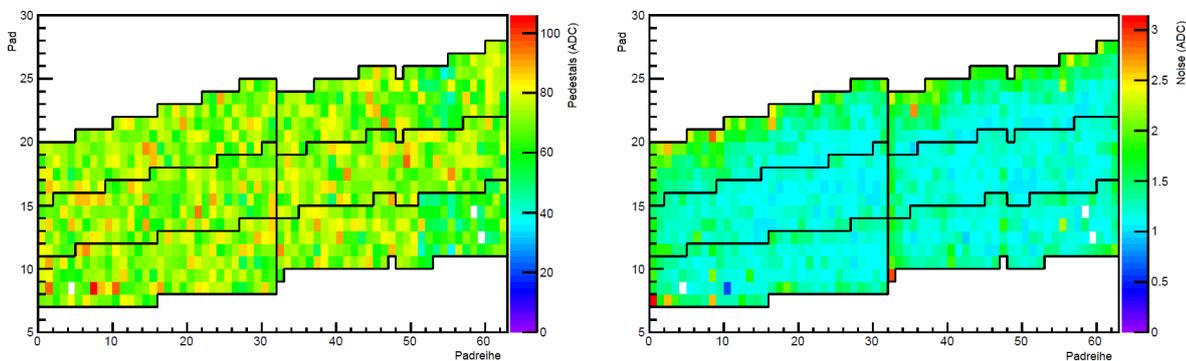


Abbildung 6.2.: Übersicht zu Pedestal-Werten (links) und Noise (rechts), exemplarisch für einen Run im ersten FEC-Setting. Der hohe Noise am Rand des aktiven Bereichs ist deutlich zu sehen.

Am Ende dieser Untersuchung wird für ein einzelnes Pad, das in beiden FEC-Settings ausgelesen worden war, die Verteilung der Zielgrößen aus allen rekonstruierten Runs angelegt. Auf diese Weise wird ebenfalls deren zeitlicher Verlauf auf dem Niveau eines einzelnen Auslesepads untersucht. Darüber hinaus gibt es ein zentralen Pedestal- wie auch Noisemittel-Wert jedes FEC-Settings, gebildet durch Aufsummieren von Runmittel-Werten und Normierung auf die Zahl der korrespondierenden Runs. Damit lassen sich die Fluktuationen der Pedestals und des Noise jedes Pads im Einzelnen zum jeweiligen zentralen Mittelwert in jedem Run berechnen. Die Verteilungen der betreffenden Fluktuationen werden nach FEC-Settings getrennt für alle Runs kombiniert aufbereitet. Im Weiteren werden die einzelnen Fluktuationen der Pads mittels 2D Histogrammen je Run aufbereitet, die der Übersicht der Ortsabhängigkeit der Fluktuationen dienen.

6. Pedestals und Noise

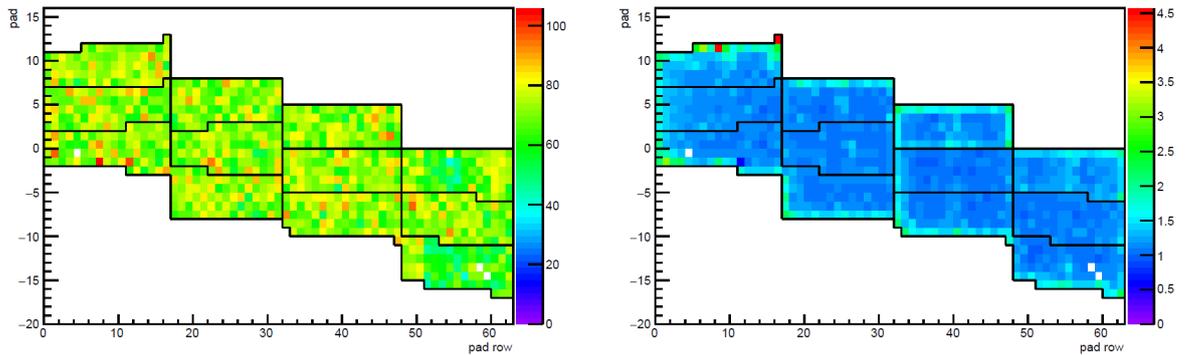


Abbildung 6.3.: Übersicht zu Pedestal-Werten (links) und Noise (rechts), exemplarisch für einen Run im zweiten FEC-Setting. Auch hier sind erhöhte Noise-Werte am Rand des beobachteten Bereichs deutlich zu erkennen.

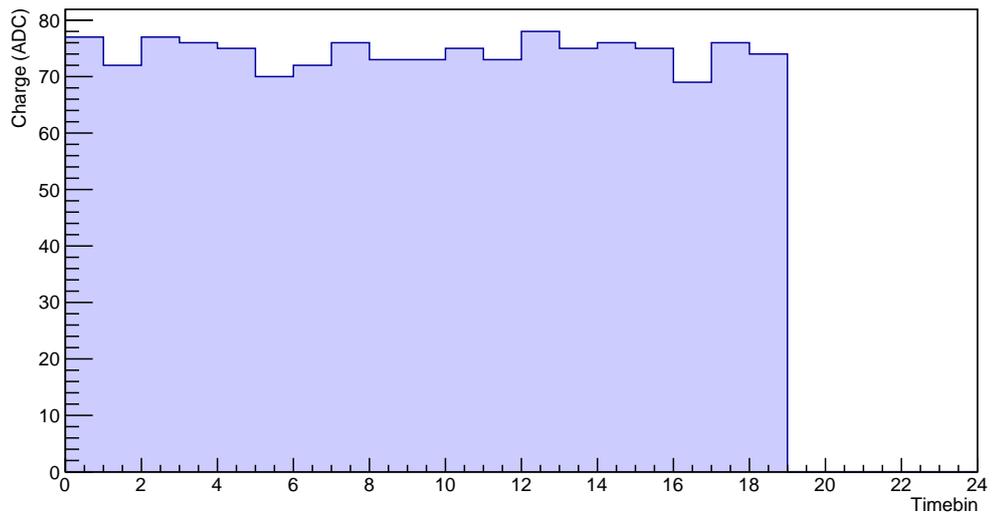


Abbildung 6.4.: Zeitlicher Signalverlauf eines einzelnen, am Rand des aktiven Bereichs gelegenen Pads bei einem Pedestallrun.

6.3. Ergebnisse der Untersuchung von Pedestals and Noise

In den Abbildungen 6.5 und 6.6 sind Verteilungen von gemessenen Pedestals sowie Noise dargestellt. Dabei handelt es sich um Werte, die jeweils aus einem einzelnen Run stammen. Ausschließlich die Messdaten der zentral liegenden FECs sind berücksichtigt worden, die Gründe dafür lassen sich im Kapitel zuvor nachlesen.

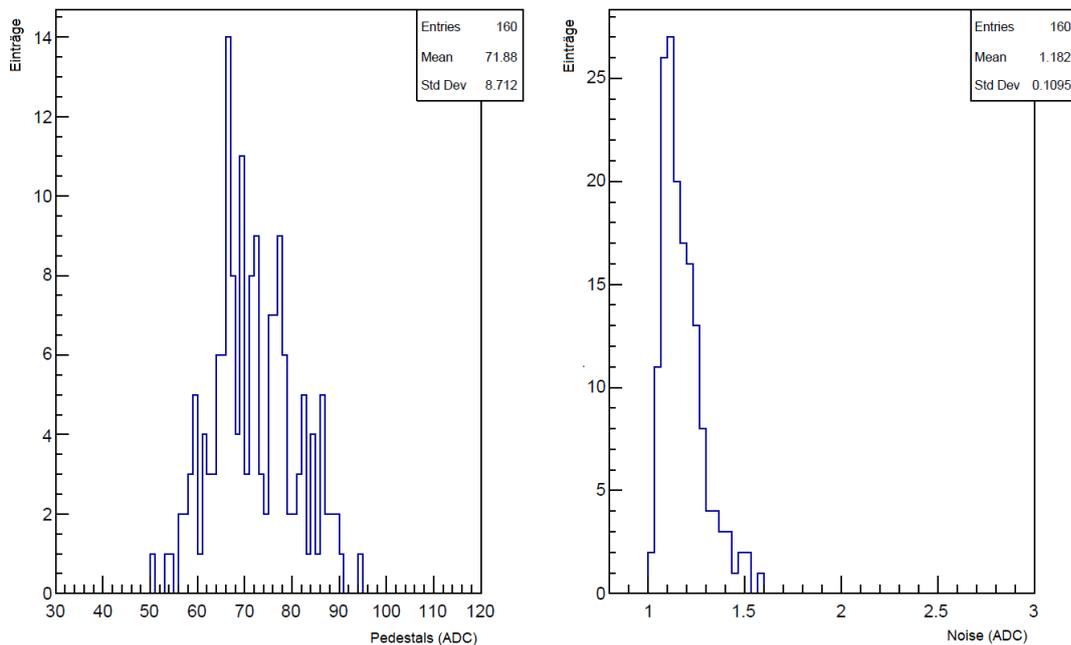


Abbildung 6.5.: Verteilung der Pedestal- (links) und Noise-Werte (rechts) einzelner Pads, die von den innen liegenden FECs ausgelesen wurden, Run 128, FEC-Setting 1.

Die Gesamtbreite beider gezeigter Pedestalverteilungen beträgt ca. 45 ADC. Neben dem größten Maximum gibt es weitere Pedestal-Werte, die als Maxima in diesen Verteilungen auftreten. Diese Charakteristik der Pedestalverteilungen findet sich bei den übrigen Runs, welche hier nicht alle im Einzelnen gezeigt werden, genauso wieder.

Bei beiden gezeigten Noiseverteilungen findet sich das Maximum der Verteilung bei

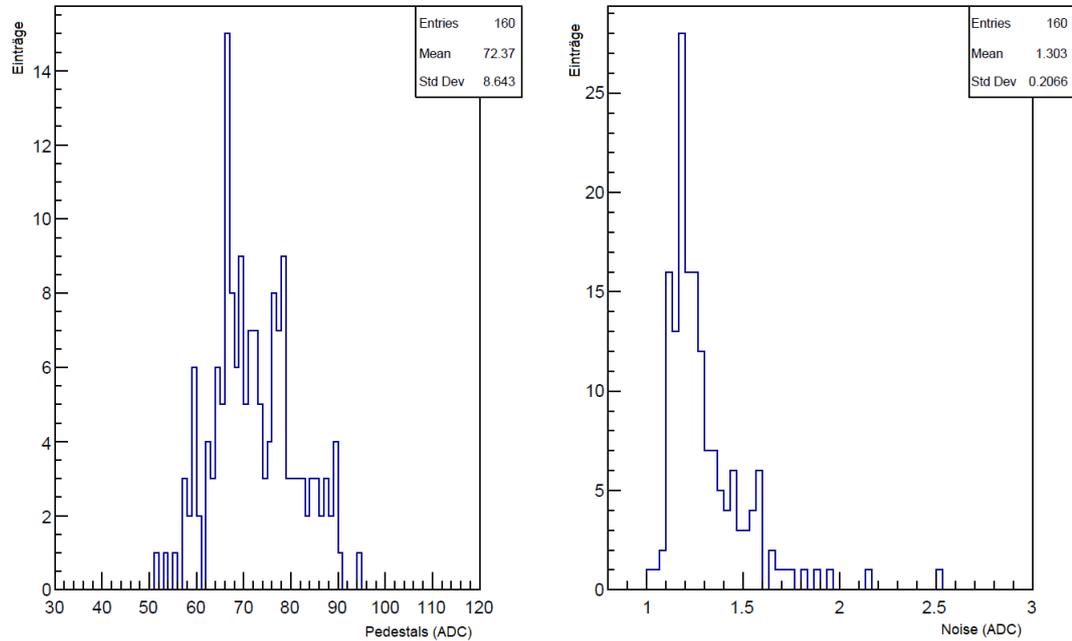


Abbildung 6.6.: Verteilung der Pedestal- (links) und Noise-Werte (rechts) einzelner Pads, die von den innen liegenden FECs ausgelesen wurden, Run 312, FEC-Setting 2.

einem höheren Wert als einem ADC. Das ist in allen übrigen Runs des Beamttests ebenfalls der Fall. Obwohl die bauliche Vorgabe der neuen Auslese der ALICE TPC für Noise maximal ein ADC lautet, sind die im betreffenden Beamttest erreichten Werte in Ordnung. Der Grund besteht darin, dass die neuen Verbindungskabel von der Padebene zur FEC für diesen Testzeitraum noch nicht in ausreichender Menge zur Verfügung standen. Die Vorgängerversion dieser Kabel hat eine etwas größere Länge, die erhöhten Noise der Ausleseelektronik verursacht. Spätere Tests belegen das, siehe dazu Abb. 6.7. Bei diesen Tests entspricht der Mittelwert des Noise der Anforderung an die Ausleseelektronik.

Vor allem nach dem Wechsel der Anordnung der FECs von Schema eins zum Schema zwei, sind vermehrt höhere Noise-Werte sowie einzelne, deutlich höhere Werte in den Verteilungen der Runs zu finden. In Abb. 6.8 sind diese Verteilungen mit Werten aller Runs zu sehen. In der Verteilung des Noise ist bei einem Wert von 1.5 ADC ein sehr kleines lokales Maximum zu sehen. Das ergibt sich daher, dass einige wenige Runs einen allgemein höheren Noise während der Laufzeit hatten.

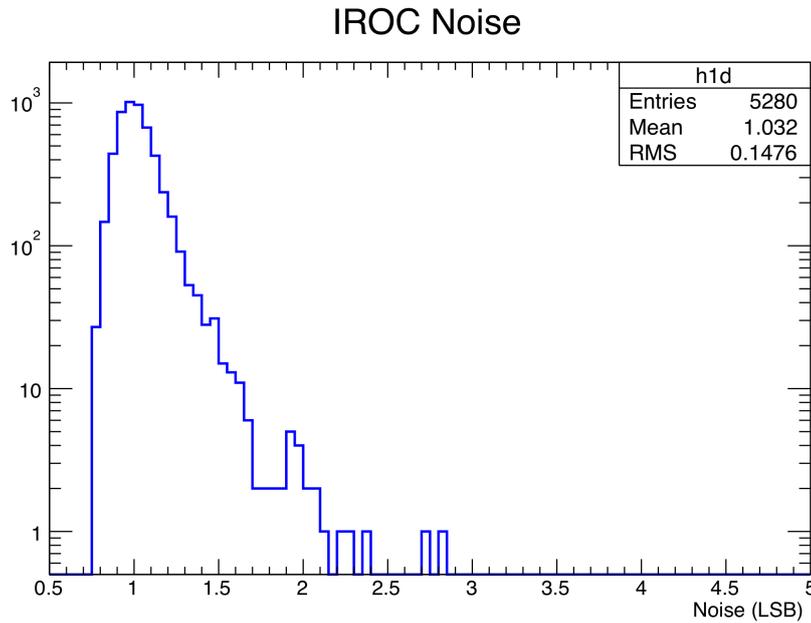


Abbildung 6.7.: Messung von Noise ca. ein Jahr nach Stattfinden des Beamtests, aus dem die hier verwendeten Daten stammen. Dieser Test wurde in einem Labor am CERN durchgeführt. Es wurden die finalen, kürzeren Verbindungskabel von Padebene zu FEC verwendet [LIP18].

Die zeitliche Stabilität der Pedestals und des Noise lässt sich in Abb. 6.9 ablesen. Hier sind die Mittelwerte beziehungsweise die Standardabweichungen, die sich aus Verteilungen, gleich denen in Abb. 6.5 und Abb. 6.6, für jeden einzelnen Run ergeben, gegen die zugehörige Startzeit der Runs aufgetragen.

Am auffälligsten sind die wiederholt ansteigenden und abfallenden Kurvenverläufe des Pedestal- sowie des Noise Mittelwertes beider Größen. Dieser Verlauf hängt mit Temperaturänderungen während des Tag - Nacht Zyklus zusammen. Die zweite Auffälligkeit ist der Sprung in den beiden Kurven, die zum Noise gehören, am letzten blauen Marker in Zeitrichtung. Zu dem Zeitpunkt wurde nicht nur das Hochspannungsgerät für den GEMStack gewechselt, sondern auch das Anordnungsschema der FECs geändert. Bei dem zweiten Platzierungsschema der FECs ist der Noise im Mittel etwas höher als im ersten.

Insgesamt ändern sich die Werte bei allen vier Kurven nur sehr gering. Der mittlere Pedestal-Wert liegt immer bei ungefähr 72 ADC, der Abstand von Minimum zu Ma-

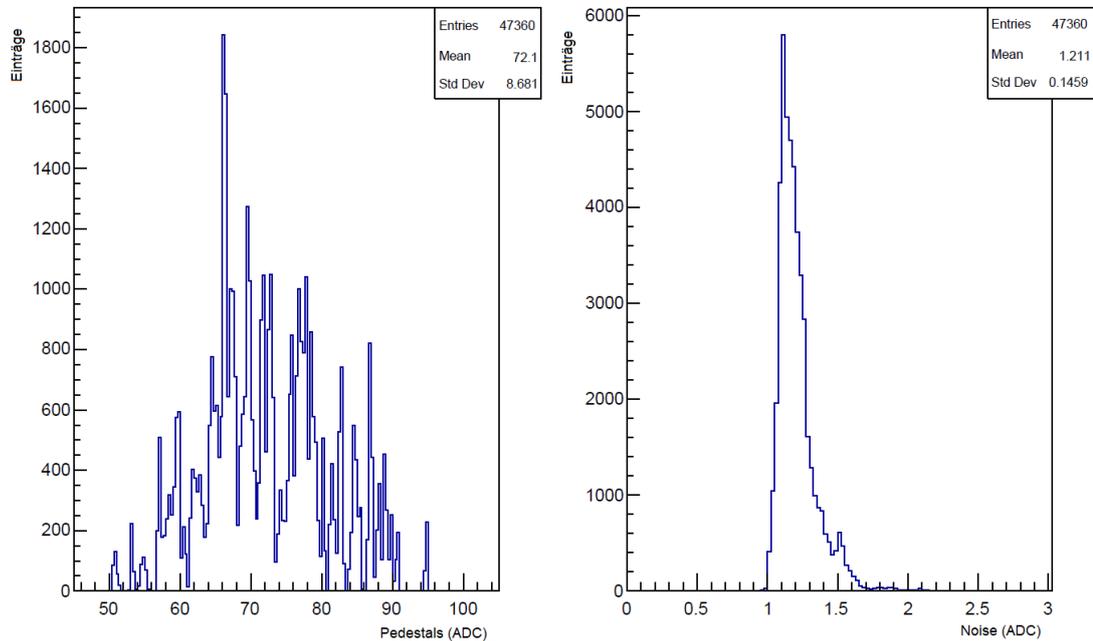


Abbildung 6.8.: Verteilung der Pedestals (links) und des Noise (rechts) aller Runs. Die genutzten Daten stammen nur von den zentralen FECs.

ximum beträgt 0.5 ADC. Die Standardabweichung der Pedestals bewegt sich zwischen 8.63 ADC und 6.72 ADC, erfährt also keine signifikante Veränderung. Der mittlere Noise schwankt vor Ändern der Anordnung der FECs um einen Wert von 1.2 ADC herum. Der Abstand zwischen Minimum und Maximum dieser Kurve beträgt 0.1 ADC. Nach Anordnungsänderung findet diese Schwankung um einen Wert von ca. 1.28 ADC herum statt, bei einem Minimum zu Maximum Abstand von 0.8 ADC. Die Standardabweichung zum Noisemittel-Wert bleibt zunächst nahezu kontinuierlich bei 0.11 ADC, nach Eingriff an den FECs ist sie erhöht und verändert sich des Öfteren etwas stärker im Vergleich zu der Zeit vor Schemenänderung der Anordnung der FECs.

Noise und Pedestals unterliegen demnach vor allem Veränderungen durch die experimentelle Umgebung, speziell der lokalen Temperatur. Dieser Einfluss wird beim Betrieb von ALICE keine Wirkung zeigen, da sich das Experiment in einem Raum unter der Erde befindet, wo Umwelteinflüsse als konstant angesehen werden können.

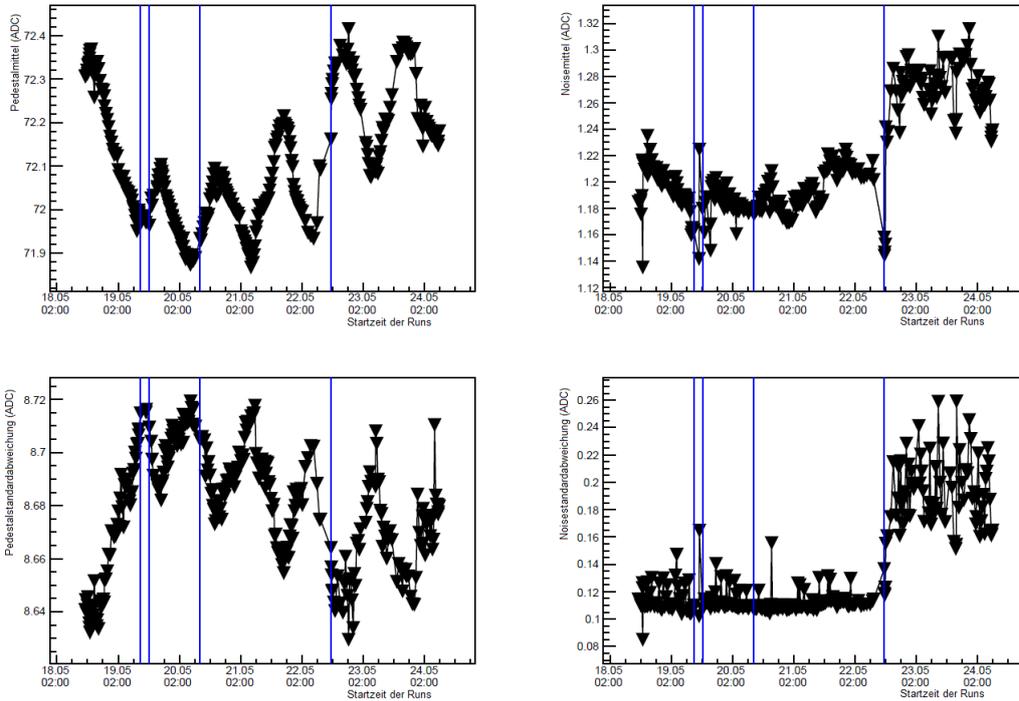


Abbildung 6.9.: Zeitlicher Verlauf der Mittelwerte und Standardabweichungen der Verteilungen von Pedestals und Noise. Die senkrechten, blauen Linien markieren einen Wechsel des Geräts zur Hochspannungsversorgung des GEMStacks.

Eine Ursache für die Veränderung beim Noise, nachdem das FEC-Anordnungsschema, zusätzlich zum Wechsel der Hochspannungsquelle der GEMs, erneuert worden ist, kann hier nicht eindeutig festgelegt werden. Es ist möglich, dass die andere, nicht ausgelesene und daher nicht angeschlossene Umgebung des ausgelesenen Padverbunds Einfluss auf die gemessenen Noise-Werte nimmt. Dieser Umstand konnte allerdings nicht genauer untersucht werden. Das zu diesem Zeitpunkt eingewechselte Hochspannungsversorgungsgerät des GEMStack kann aber als Ursache ausgeschlossen werden, da es bereits, als die FECs im ersten Schema angeordnet waren, verwendet worden ist. Ebenso kann ausgeschlossen werden, dass die zuvor nicht ausgelesenen Pads, die in dem neuen aktiven Bereich liegen, von sich aus für höheren Noise verantwortlich sind. Wäre dies der Fall, so lieferten die Pads, die sowohl im ersten, als auch im zweiten Anordnungsschema ausgelesen werden, weiterhin ähnliche Werte.

Die Änderung des FEC-Settings als Ursache der Noise-Veränderung hat keine Auswirkungen auf den Betrieb der ALICE TPC, da jederzeit alle Pads einer Auslesekommer mit der Ausleseelektronik verbunden sein werden. Darüber hinaus liegt der Betrag der angesprochenen Erhöhung im Noise bei ca. 0.08 ADC. Der Einfluss des zugrundeliegenden Effekts wird im Vergleich zu den Messwerten der ALICE TPC also vernachlässigbar gering sein.

In Abb. 6.10 wird der zeitliche Verlauf von Pedestal und Noise über den gesamten Beamtestzeitraum hinweg bei einem einzelnen Pad betrachtet.

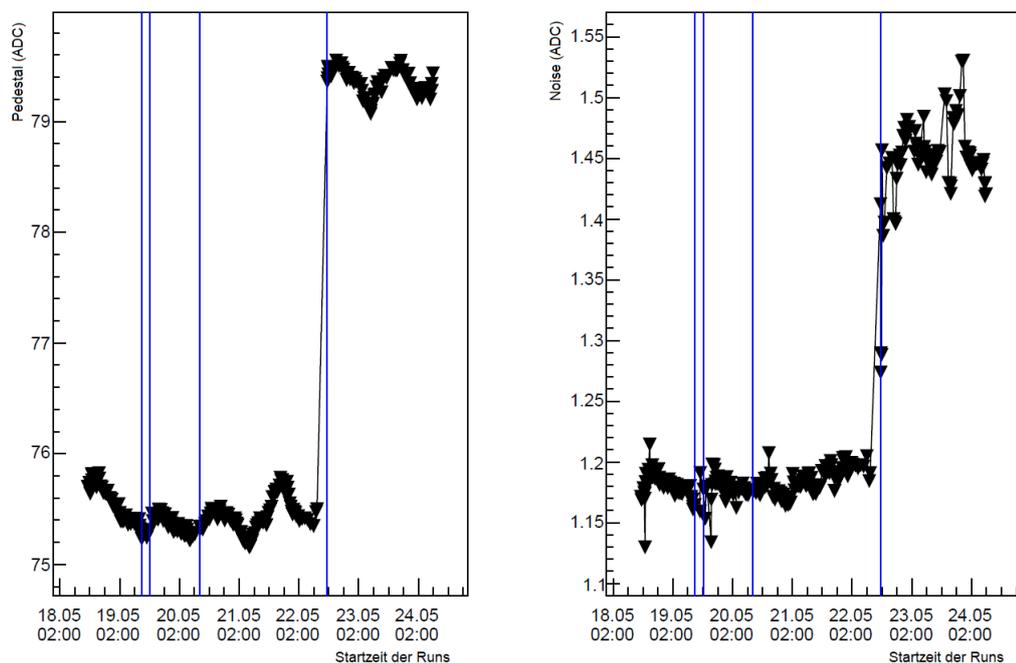


Abbildung 6.10.: Zeitlicher Verlauf von Pedestal (links) und Noise (rechts) eines einzelnen Pads in der Ausleseketten.

Dabei zeigt sich hier sowohl in der Kurve des Pedestal-Wertes als auch in der Kurve des Noise-Wertes die Stabilität der jeweiligen Werte innerhalb beider Anordnungsweisen der FECs auf dem Niveau eines Pads. Schwankungen des Pedestals finden in dem Bereich von einem ADC statt und sind mit Änderungen von Umweltbedingungen in Verbindung zu bringen. Gleiches gilt für den Noise des einzelnen Auslesepads. Allerdings ist dieser im zweiten FEC-Anordnungsschema verglichen zum ersten weniger stabil. Aus densel-

ben Gründen wie zuvor stellt dies aber keine Problematik für den Betrieb der ALICE TPC dar.

Wird aus Mittelwerten bzw. den Standardabweichungen der betrachteten Größen jedes einzelnen Runs für jedes FEC-Setting jeweils einen Gesamtmittelwert sowie eine Gesamtstandardabweichung jeder untersuchten Größe erzeugt, wird es möglich die Fluktuationen um diesen Gesamtwert zu betrachten. Dazu werden die jeweiligen Werte von den zugehörigen Gesamtwerten subtrahiert. Wird zusätzlich noch die Zeitkomponente berücksichtigt, lassen sich wiederum die zeitlichen Verläufe der Fluktuationen untersuchen, die unabhängig von einem Wertesprung in den direkten Messdaten, Auskunft darüber geben, inwiefern und wie stabil die Messgrößen sind, die im Fokus dieser Untersuchung liegen. In Abb. 6.11 sind die Verteilungen der Differenzen der Mittelwerte von Pedestals und Noise der jeweiligen Runs zum den entsprechenden Mittelwerten des FEC-Settings zu sehen. Die Grafiken in Abb. 6.12 zeigen das eben beschriebene zeitliche Verhalten.

Die run-weisen Fluktuationen der Mittelwerte der Pedestals bewegen sich vornehmlich in einem Rahmen von ± 0.2 ADC um die FEC-Settingspezifischen Pedestalmittel herum. Im Falle des Noise liegen diese Fluktuationen im Bereich von ± 0.1 ADC um die jeweiligen, für die FEC-Settings spezifischen Mittel herum. Anhand der Verläufe der Kurven in Abb. 6.12 können die Pedestals und der Noise der neuen ALICE TPC Ausleseammern eindeutig als stabil bewertet werden.

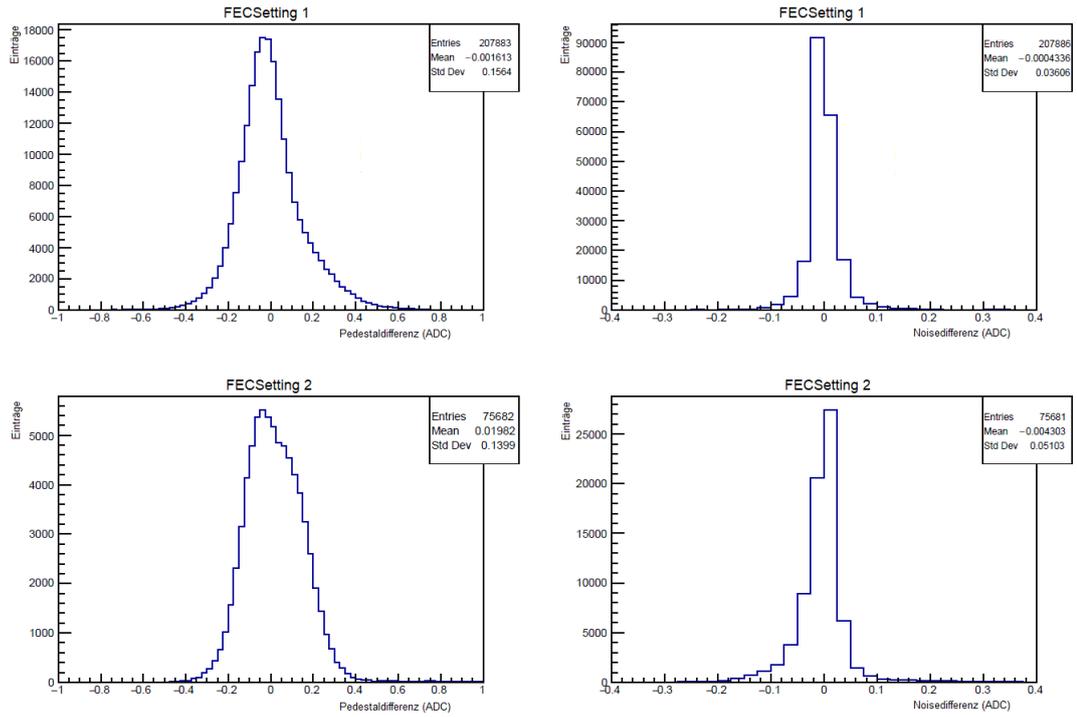


Abbildung 6.11.: Verteilung der Mittelwertdifferenzen von Pedestals und Noise von einzelnen Runs zum Mittelwert aus allen Runs innerhalb eines gesamten FEC-Settings. Die Verteilungen werden jeweils nach FEC-Setting getrennt wiedergegeben.

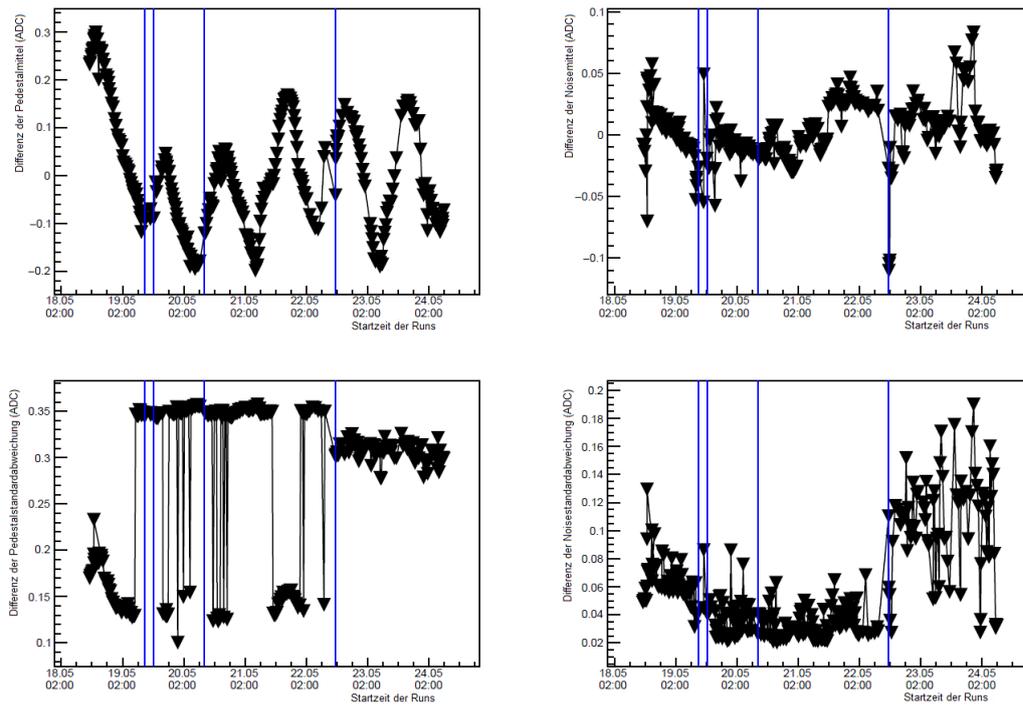


Abbildung 6.12.: Zeitlicher Verlauf der Differenz von runspezifischem zu FEC-Settingspezifischem Mittelwert (oben) bzw. Standardabweichung (unten) von Pedestals (links) und Noise (rechts).

7. Common Mode Effect

7.1. Zielsetzung der Analyse

Die Zielsetzung der zweiten Analyse ist es, den Common Mode Effect aus den Beamttestdaten quantitativ herauszuarbeiten, ebenso wie seine zeitliche Verteilung, die Homogenität des Common Mode Effect im aktiven Bereich zu untersuchen und seine erwartete Linearität bestätigen zu können.

Bei den analysierten Daten handelt es sich um dieselben Daten, wie sie zuvor bei der Untersuchung der Pedestals und des Noise genutzt worden sind. Genauso werden diese mithilfe des *C++* basierten Softwareframework *O²* verarbeitet. Bei dieser Analyse wurde sowohl bestehender Softwarecode erweitert als auch neuer Softwarecode angelegt.

7.2. Selektion der Daten bei der Analyse des Common Mode Effect

Diverse Selektionskriterien, auch *Cuts* genannt, kommen in der Analyse des Common Mode Effect zur Anwendung.

Ein Cut auf die Zahl der Cluster, die innerhalb eines Events rekonstruiert worden sind, soll sicherstellen, dass ausschließlich solche Events zur Analyse verwendet werden, in denen nur eine einzelne Teilchenspür gemessen worden ist. Diese sollen aber wenigstens fast den gesamten aktiven Bereich durchquert haben. Bei Events mit mehreren Teilchenspüren würde bei der Analyse das Problem auftreten, dass einerseits ein Spursignal den Common Mode Effect der jeweils anderen teilweise unsichtbar macht und andererseits die genaue Lokalisierung der Spuren schwieriger wird. Im Weiteren stellt dieser Cut sicher, dass bei verwendeten Events kein hoher Messuntergrund geherrscht hat, da dieser die Clusterzahl erhöht. Events, bei denen mindestens ein Deltaelektron entstanden ist, werden aus demselben Grund, sofern die Deltaelektronenclusterzahl hoch genug ist, ebenso aussortiert. Die Größe des Intervalls der akzeptierten Clusteranzahl bei diesem

Cut beträgt [55 - 70]. In Abb. 7.1 wird die Verteilung der Eventclusterzahl eines gesamten Runs dargestellt. Es gibt zwei Maxima, wovon das erste eine Clusterzahl bevölkert, die zu gering ist, um von vollständigen Teilchenspuren im aktiven Bereich zu stammen.

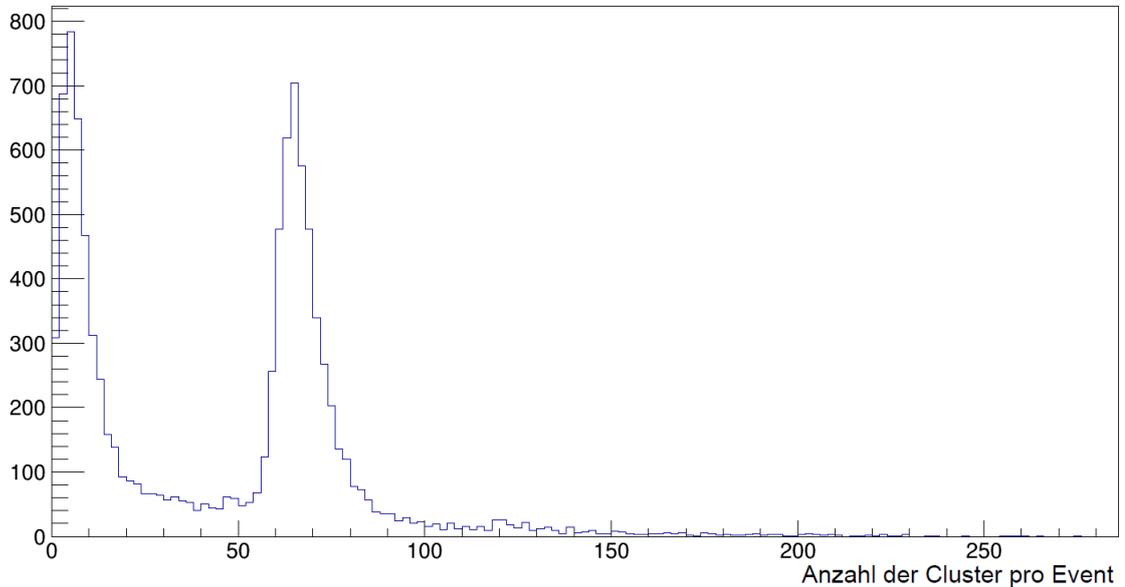


Abbildung 7.1.: Häufigkeitsverteilung der Events mit jeweiliger Clusterzahl, Run 90.

Ein naheliegender Ausschlussgrund für einzelne Pads im aktiven Bereich ist gegeben, wenn diese fehlerhaft sind. Diese liefern konstante, nicht sinnvolle Messwerte. Sie werden anhand ihrer Koordinaten vor dem eigentlichen Analyseprozess aussortiert.

Die Selektion auf den Ladungswert eines Digits mittels eines Schwellenwertes von 5 ADC-Counts hat Relevanz für die Bestimmung der Lage der Teilchenspur im Raum. Durch diese soll die korrekte Unterscheidung von Digits der gemessenen Teilchenspur und Digits der Spurumgebung gewährleistet werden. Die Ladung muss über dem angegebenen Schwellenwert liegen, damit das betreffende Digit als zur Spur gehörend gewertet wird. Eben dieser Wert ist der Schwellwert der Rekonstruktionssoftware, der von Digits erreicht werden muss, um einem Cluster zugeordnet werden zu können.

Dieser Schwellwert soll ein gutes Signal-zu-Rauschen-Verhältnis gewährleisten, gleichzeitig jedoch keine relevanten Messdaten ausschließen.

Bei der Lagebestimmung der Spur werden Events ausgeschlossen, bei denen diese auch nur an einer Stelle mit zu großer Ungenauigkeit festgestellt werden kann. Der Grenzwert dieses Kriteriums liegt bei einer Ungenauigkeit von 1.65 Pads bzw. Timebins in y-Richtung. In Richtung der jeweils anderen Koordinate, der Reihennummer, sind die Ungenauigkeiten der einzelnen Punkte zu gering, um damit eine sinnvolle Selektion vorzunehmen. Ebenso werden Events, in denen der Ladungsschwerpunkt in nur einer Padreihe zu sehr von der errechneten Spurlage abweicht, von der Analyse nicht akzeptiert. Dieser Cut findet bei der Bestimmung der Spurlage in Zeitrichtung Anwendung und sortiert Events mit einer Abweichung ab 1.3 Timebins in einer einzelnen Padreihe bzw. einem Betrag von 20 in der Summe der Abweichungen aller Padreihen eines Events, aus. Die finalen Schwellwerte dieser Cuts, die anhand der Lokalisierung der Spur selektieren, sind durch Variation und Vergleich der Ergebnisse optimiert worden.

Ein *Fiducial Cut* auf die Timebins kommt zum Einsatz. Die Timebins Nummer Null bis Vier und die Timebins Vierzehn bis Neunzehn jeder Messung werden durch diesen ausgeschlossen. Der Grund dafür besteht darin, dass in diesen Timebins Probleme bei der Aufzeichnung der Messwerte aufgetreten sind.

Die weitere Selektion der Daten beinhaltet den Ausschluss der ersten fünf und der letzten sechs Padreihen aus dem Analyseprozess. Der Grund dafür ist, dass es in diesen Padreihen zur Verzerrung der Messdaten gekommen ist. Die Ursache dafür liegt unter anderem an hohem Noise, Schwankungen im Gain und einem zeitweise *floatenden* Hochspannungssegment der GEMs.

Aufgrund zu hohen Noises werden ebenfalls die zwei äußeren Pads am unteren und oberen Rand des aktiven Bereichs ausgeschlossen (siehe dazu Kap. 6, Abb. 6.3).

Die letzte Selektion der Digits erfolgt beim Füllen des Histogramms, das den Common Mode Effect wiedergibt. Dabei werden nur Digitladungen, die im Intervall von $[-20, 5]$ ADC-Werten liegen, akzeptiert. Werte unterhalb dieses Intervalls sind unphysikalisch, Werte darüber sind als zum Signal der Teilchenspur gehörig anzusehen.

7.3. Vorgehen bei der Analyse des Common Mode Effect des neuen Auslesekammercotyps

Die Logik der Analyse des Common Mode Effect ist direkt in die Rekonstruktion der Dataruns implementiert worden. Dabei wird diese Logik bei der Rekonstruktion eines Runs für jedes einzelne Event aufgerufen. Zuerst wird der Cut auf die Clusterzahl im Event angewandt. Besteht ein Event dieses Ausschlusskriterium, werden die zugehörigen Daten in der ersten Phase der Analyse weiterverarbeitet.

In dieser Phase werden sämtliche Koordinaten der Digits sowie die Messgrößen Ladung und Zeit extrahiert. Mithilfe dieser aggregierten Kenndaten wird von jedem Event jedes Runs ein Eventdisplay angelegt (vgl. Abb. 7.2).

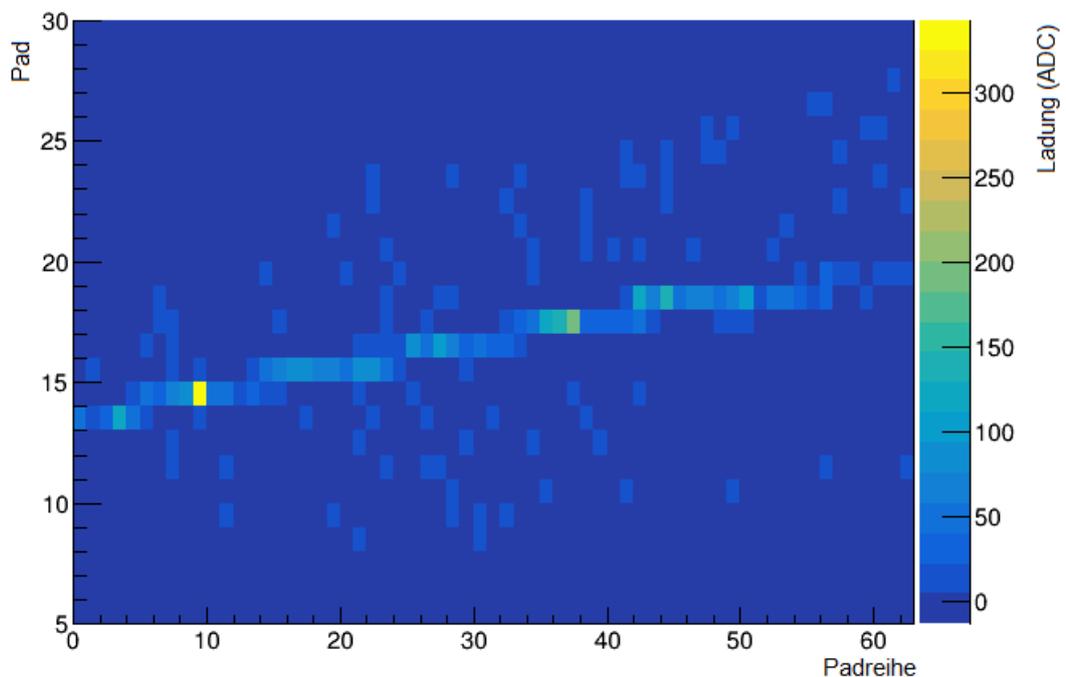


Abbildung 7.2.: Eventdisplay eines einzelnen Ein-Spur-Events. Während der Analyse des Common Mode Effect wird das Event noch weiter verarbeitet werden. An dieser Stelle wurden Events nur aufgrund ihrer Clusterzahl selektiert.

Ebenso wird an diesem Punkt der Rand des aktiven Bereichs in jeder Padreihe ermittelt,

7.3. Vorgehen bei der Analyse des Common Mode Effect des neuen Auslesekammercyps

sodass neben dem Ausschluss von Padreihen am Anfang und am Ende ebenfalls die zwei äußeren Randpads des aktiven Bereichs ausgeschlossen werden können. Gleichzeitig wird der Fiducial Cut in Zeitrichtung eingesetzt.

In diesem Teil des Analyseprozesses wird auch die Lage der Spur ermittelt. Dazu werden zwei Profilhogramme benötigt. Diese haben die Eigenschaft, dass sie den Schwerpunkt aller Einträge für jede Stelle der x-Achse automatisch bestimmen und wiedergeben. In dieser Analyse wird die gemessene Ladung eines Digits als Gewichtungsfaktor eines Eintrags benutzt, sodass der Schwerpunkt möglichst mit der Stelle der höchsten gemessenen Ladung übereinstimmt. Da die höchsten detektierten Ladungen eines Events aus der Ionisierung entlang der Bahn eines durchlaufenden geladenen Teilchens stammen, gibt die Lage aller Schwerpunkte den ungefähren Verlauf der Teilchenspur wieder. In einem der Profilhogramme wird auf diese Weise die Spurlage in der Padebene, das heißt in die Richtungen Padreihe und Padnummer bestimmt, in dem anderen Histogramm die Spurlage in der Ebene aus Zeit- bzw. Höhenrichtung und Reihenummer. Beim Füllen dieser Histogramme wird bereits die Unterscheidung zwischen Digits des Spursignals und solchen, die nicht zu dem Signal gehören angewendet.

Des Weiteren wird die Zeitverteilung der Digits des Spursignals angefertigt (vgl. Abb. 7.3). Das Timebin mit den meisten, aber einer Mindestzahl von 20 Einträgen wird als t_0 definiert. Dies ist als das Timebin aufzufassen, in welchem der Hauptteil der Teilchenspur liegt. Kann kein t_0 in einem Event bestimmt werden, wird das betreffende Event von der Analyse ausgeschlossen.

Das t_0 wird benötigt, um mehrere einzelne Spursignale und damit auch mehrere einzelne Common-Mode-Signale auf einen gemeinsamen Zeitbereich, der in diesem Fall abhängig vom t_0 ist, projizieren zu können. Auf diese Weise wird es möglich mehrere Signale gleichzeitig und gleichwertig zu verarbeiten und zu analysieren. Weil das Signal, das vom Common Mode Effect hervorgerufen wird, im einzelnen eine sehr geringe Stärke aufweist, handelt es sich dabei um einen wichtigen Schritt für die Analyse.

Durch lineares Fitten der einzelnen Schwerpunkte in den zuvor behandelten Profilhogrammen wird der Verlauf der Teilchenspur genauer wiedergegeben, siehe dazu Abb. 7.4. An dieser Stelle werden die Cuts auf die Fehler der Einträge sowie dem Abstand einzelner Einträge zum Fit bzw. die Summe dieser Abstände benutzt.

Durch diesen Schritt wird in der Analyse ein feineres t_0 zugänglich, im weiteren als $t_0 \text{ fine}$ bezeichnet. Der Unterschied zum t_0 besteht darin, dass ein eigener Wert für jede Padreihe des aktiven Bereichs eines Events existiert, statt nur einem Wert für ein gesamtes Event.

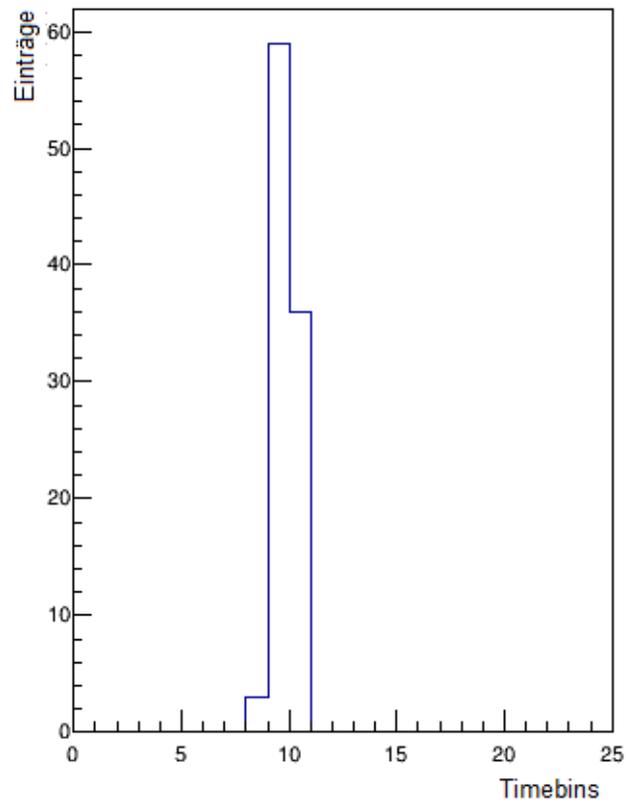


Abbildung 7.3.: Verteilung der Timebins der als zur Spur gehörend identifizierten Digits. Aus dieser Verteilung wird das t_0 bestimmt.

Am Ende dieser Phase werden zu Kontrollzwecken die Verteilung des t_0 fine des aktuell verarbeiteten Events erzeugt bzw. die des gesamten Runs ergänzt.

7.3. Vorgehen bei der Analyse des Common Mode Effect des neuen Auslesekkammertyps

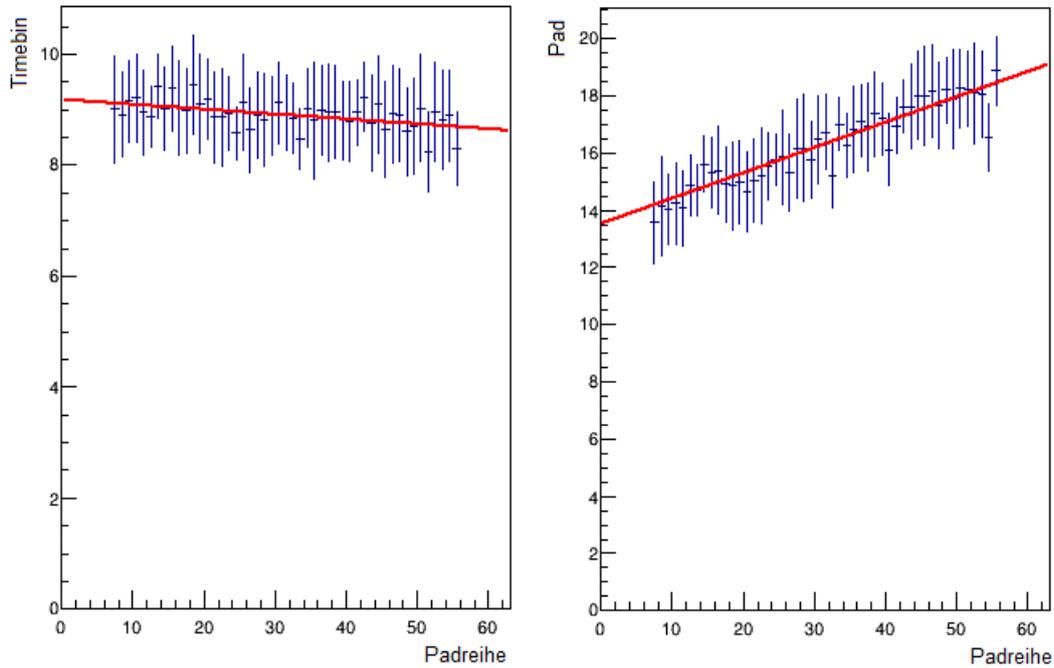


Abbildung 7.4.: Profilhistogramme zur Bestimmung der Spurlage in einem einzelnen Event. Das linke Histogramm gibt die Lage in z- bzw. Zeitrichtung und in Richtung der Padreihen wieder. Das rechte Histogramm gibt die Lage in der Padebene wieder.

In der zweiten Phase der Analyse die zuvor gefilterten Daten in verschiedene Ergebnisgrafiken eingetragen. Dabei werden das Spursignal und das Signal, das vom Common Mode Effect verursacht wird, separiert. Die Lage der Spur in Koordinaten der Padreihe und Padnummer sind durch den entsprechenden linearen Fit bekannt. Pads im Abstand eins um diese Pads herum, tragen mit den von ihnen gemessenen Signalen ebenfalls zum Gesamtmesssignal der Spur bei. Die von den übrigen Pads detektierten Messsignale werden in Grafiken, die das durch den Common Mode Effect hervorgerufene Messsignal wiedergeben sollen, eingetragen. Der Zeitrahmen der berücksichtigten Digits wird auf minus zwei bis plus fünf um t_0 bzw. $t_{0\text{ fine}}$ beschränkt. Außerhalb dieses Rahmens ist kein Anteil eines der gesuchten Messsignale zu finden.

Die Ergebnisse werden auch nach Elektronen und Pionen getrennt dargestellt. Die Unterscheidung findet anhand der zur Spurmessung gehörenden Werte des Cherenkovde-

tektors statt. Die entsprechende Anzahl der zu den jeweiligen Grafiken beitragenden Pads sowie die Zahl der akzeptierten Events werden mitgezählt, um eine Normierung der Ergebnissignale vornehmen zu können.

Damit endet die zweite Analysephase, es kann optional die Normierung der Ergebnisse, die auf den gesamten Run bezogen sind, ausgeführt werden. Diese Normierung gibt das gemittelte Signal einer einzelnen Teilchenspur, also aus einem einzelnen Event, sowie das durchschnittliche Signal des Common Mode Effect, das einerseits von einem einzelnen Auslesepad innerhalb eines Events empfangen wird und andererseits von der gesamten Kammer in einem Event gemessen wird, an. Zudem wird jedem Spursignal in den Ergebnisgrafiken die Gamma-4-Funktion angepasst.

Nachdem die vorhergehenden Schritte für alle Dataruns absolviert worden sind, werden in der dritten und letzten Phase dieser Analyse die unnormierten Ergebnisse aus mehreren Runs zusammengenommen und analysiert, sodass eine abschließende Aussage mit höherer zugrunde liegender Statistik getroffen werden kann. Hiervon werden Runs mit einem zu geringen Anteil akzeptierter Events, welcher ebenfalls in dieser Phase bestimmt wird, ausgeschlossen.

Die Linearität des Common Mode Effect wird überprüft, indem von jedem beitragenden Run der integrierte Betrag des Common-Mode-Signals gegen die Amplitude des Spursignals aufgetragen wird. Der erwartete Verlauf dieser Einträge ist linear. Zur Überprüfung der Homogenität des Common Mode Effect, wird ein Übersichtshistogramm des gesamten aktiven Bereichs angelegt, das von jedem einzelnen Auslesepad einen aus allen beitragenden Runs gemittelten Wert des Common Mode Effect enthält.

Die Ergebnisse, die in dieser Phase erlangt worden sind, werden wie zuvor auf ein Event normiert und zusätzlich nach Gain, FEC-SSetting, Pionen und Elektronen getrennt dargestellt. Die Gamma-4-Funktion wird an die jeweiligen Spursignale angepasst.

7.4. Analyseergebnisse zum Common Mode Effect

Zunächst werden die Ergebnisse der Analyse des Common Mode Effect anhand der kombinierten Ergebnisse aller verwendeten Datenruns betrachtet und diskutiert. Dabei wird der Fokus auf den Daten, die bei einem Gain von 2000 aufgenommen worden sind, liegen. Das hat den Grund, dass dies die ausgewählte Einstellung des Gains der ALICE TPC im Run 3 sein wird, bei Verwendung von Ne-CO₂-N₂ (90-10-5) als Detektorgas. Die Er-

gebnisse der Daten aus Runs mit einem anderen Betrag des Gains finden sich im Anhang.

In Abb. 7.5 links wird das mittlere Messsignal einer Teilchenspur gezeigt, rechts in der Abbildung ist das mittlere gemessene, wie auch das mittlere erwartete Signal des Common Mode Effect, das von einem Pad detektiert wird, dargestellt. Das Spursignal ist auf ein Event normiert, d.h. es entspricht ungefähr dem Signal einer einzelnen Teilchenspur. Das gemessene wie auch das erwartete Common-Mode-Signal sind auf ein Pad in einem Event normiert.

Das erwartete Common Mode Signal wird durch Skalieren des gemessene Spursignal gebildet. Der Skalenfaktor unterscheidet sich je nach gewählter Norm. Er beinhaltet aber immer neben einem Faktor -1 , um die verschiedene Polarität von Signal und Common Mode Effect zu berücksichtigen, die Anzahl aller Pads der IROC, auf welche sich der Betrag des Spursignals im Common Mode Effect aufteilt.

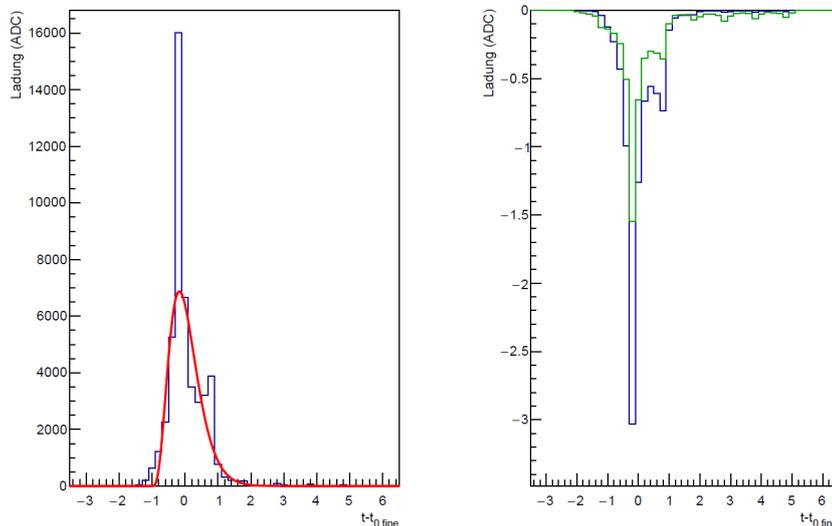


Abbildung 7.5.: Mittleres, normiertes Messsignal einer Teilchenspur (links), des Common Mode Effect (rechts, grün) und das mittlere erwartete Common-Mode-Signal (rechts, blau), aufgetragen gegen die Differenz von t_0_{fine} zum jeweiligen Timebin. Die Daten stammen aus sämtlichen Runs, die mit einem Gain von 2000 aufgenommen worden sind.

7. Common Mode Effect

Die Signale haben ein deutliches Maximum knapp vor $t-t_0 \text{ fine} = 0$ mit einer Signalbreite von zwei Timebins. An dem jeweils größten Maximum der beiden Kurven in der rechten Grafik von Abb. 7.5 lässt sich ablesen, dass das gemessene Signal, das durch den Common Mode Effect hervorgerufen wird (grüne Kurve), zu ungefähr 50 % dem erwarteten Signal (blaue Kurve) entspricht. Sowohl im Spursignal als auch im Common-Mode-Signal sind neben dem Maximum weitere Extremwerte zu erkennen, die jeweils in einem festen Abstand von einem Timebin auftreten. Diese weiteren Extrema haben bis auf das knapp vor $t-t_0 \text{ fine} = 1$ nur eine sehr geringe Größe. Die Form des Spursignals, das in dieser Analyse herausgearbeitet worden ist, wird noch nicht einwandfrei durch eine Gamma-4-Funktion beschrieben. Es sollte bei diesem Ergebnis berücksichtigt werden, dass die Daten in zwei verschiedenen Anordnungsschemata der FECs aufgenommen worden sind, die jeweils leicht unterschiedliche Messsituationen bewirken.

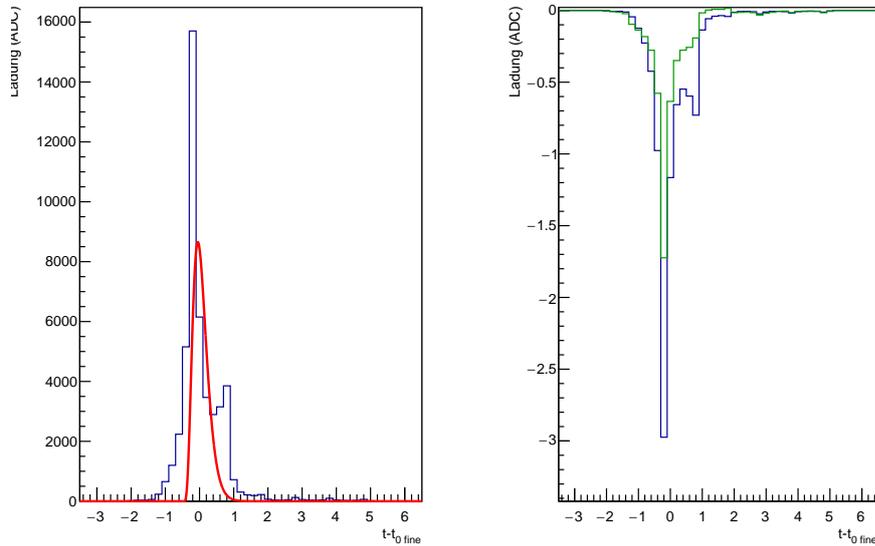


Abbildung 7.6.: Mittleres, normiertes Messsignal einer Teilchenspur (links), des Common Mode Effect (rechts, grün) und das mittlere erwartete Common-Mode-Signal (rechts, blau), aufgetragen gegen die Differenz von $t_0 \text{ fine}$ zum jeweiligen Timebin. Die Daten stammen aus sämtlichen Runs, die mit einem Gain von 2000 und im ersten Anordnungsschema der FECs aufgenommen worden sind.

Die in diese zwei Einstellungen separierten Ergebnisse zeigen die Abbildungen 7.6 für das erste Schema und 7.7 für das zweite Schema. Das Spursignal ist in diesen beiden Abbildungen auf ein Event normiert, das gemessene sowie das erwartete Common-Mode-Signal sind auf ein Auslesepad pro Event normiert.

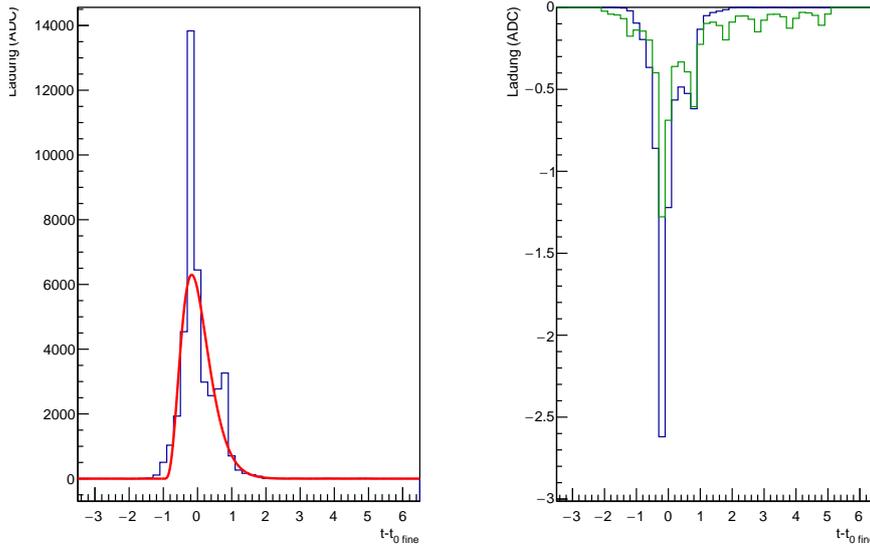


Abbildung 7.7.: Mittleres, normiertes Messsignal einer Teilchenspur (links), des Common Mode Effect (rechts, grün) und das mittlere erwartete Common-Mode-Signal (rechts, blau), aufgetragen gegen die Differenz von $t_0 \text{ fine}$ zum jeweiligen Timebin. Die Daten stammen aus sämtlichen Runs, die mit einem Gain von 2000 und im zweiten Anordnungsschema der FECs aufgenommen worden sind.

Nach der Separation zeigt sich, dass in erster Anordnungsweise der FECs der gemessene Common Mode Effect besser mit dem Erwarteten übereinstimmt. Die Übereinstimmung der stärksten Minima beträgt ungefähr 60 %. Die Kurve des gemessenen Common-Mode-Signals in der rechten Grafik in Abb. 7.6 (grün), weist neben einem deutlich ausgeprägten Minimum nahe von $t-t_0 \text{ fine} = 0$ nur sehr schwach ausgeprägte weitere Minima auf. Das Minimum knapp vor $t-t_0 \text{ fine} = 1$, das in den für beide Anordnungsschemata der FECs kombinierten Ergebnissen zu sehen ist, ist in dem gemessenen Common-Mode-Signal in Abb. 7.6 nicht erkennbar. Im Gegensatz zum ersten Anordnungsmuster weist

das gemittelten Teilchenspursignal pro Event im zweiten Anordnungsmuster der FECs einen geringeren Wert auf (Abb. 7.7, linke Grafik).

Die Übereinstimmung des gemessenen und des erwarteten Common-Mode-Signals liegt in diesem Setting bei 48 %, also deutlich unter der des ersten Anordnungsschemas. Gleichzeitig sind in der zweiten Anordnung der FECs die weiteren Minima, neben dem tiefsten Minimum, stärker ausgeprägt, als in erster Anordnung.

Das Spursignal wird trotz nach FEC-Settings getrennter Ergebnisse in keinem Fall passend durch eine Gamma-4-Funktion beschrieben. Diese Tatsache und die Anwesenheit von mitunter starken Minima im gemessenen Common Mode Effect, die zeitlich nicht mit Maxima des Spursignals in Verbindung zu bringen sind, deuten darauf hin, dass die Selektion der Daten, die für diese Analyse verwertbar sind, noch nicht vollständig ausgereift ist. Das betrifft vor allem solche Daten, die im zweiten Anordnungsmuster der FECs aufgezeichnet wurden. Es besteht allgemein die Möglichkeit, dass Einflüsse anderer Effekte Signalform und Stärke, vor allem die des empfindlichen Common-Mode-Signals, verändern.

Bei Betrachtung von Ergebnissen einzelner Runs, erhärtet sich dieser Eindruck. In Abb. 7.8 wird das Verhältnis der Integrale aus gemessenem zum erwartetem Common-Mode-Signal dargestellt. Anhand dieser Darstellung lässt sich überprüfen wie sehr sich gemessener und erwarteter Common Mode Effect in den einzelnen Runs entsprechen und möglicherweise feststellen, weshalb die kombinierten Ergebnisse der analysierten Dataruns sind wie zuvor beschrieben.

Die Ursache für Lücken im Verlauf des Graphen in Abb. 7.8 liegt bei Runs, in denen die Einstellung des Gains nicht 2000 war, die nicht vom Typ Datarun oder die allgemein aus verschiedenen Gründen nicht verwendbar sind. In der Menge der analysierten Runs gibt es sowohl welche mit einem gemessenen Common-Mode-Signal, das mitunter sehr deutlich über der erwarteten Größe liegt, als auch Runs bei denen es unter der Erwartung liegt oder sogar einen positiven Betrag hat. Es kann demnach sowohl Ursachen geben, die das Common-Mode-Signal schwächer bzw. stärker erscheinen lassen, als auch Ursachen, welche dasselbe bei dem Spursignal bewirken, womit eine zu hohe oder zu niedrige Erwartung an die Stärke des Common-Mode-Signals einhergeht. An dieser Stelle kann mit den Informationen aus der Abbildung 7.8 nur sicher gesagt werden, dass es Einflüsse geben muss, durch die das Common-Mode-Signal aktiv unterdrückt wird. Dies wird aufgrund der negativen Einträge im Graphen gefolgert, die nur aus verschiedenen Vorzeichen der in Verhältnis gesetzten Werte resultieren können. Das erwartete Common-Mode-Signal eines Runs wird durch negative Skalierung des positiven Spursignals gebildet. Daraus folgt, dass bei negativen Einträgen in Abb. in 7.8 ein positives Common-Mode-Signal gemessen worden sein muss.

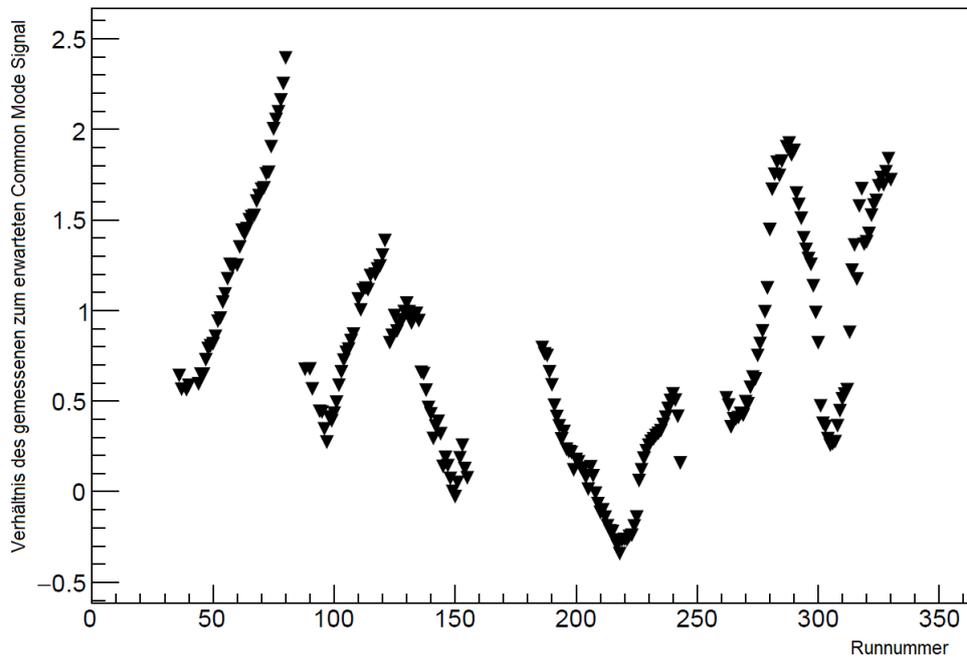


Abbildung 7.8.: Verhältnis der Integrale des gemessenen zum erwarteten Common-Mode-Signal der Ergebnisse jedes Runs, der einen festgelegten Gain von 2000 hat. Das gemessene Signal durch den Common Mode Effect ist nicht normiert, es handelt sich um die akkumulierte Ladung aus den Events der jeweiligen Runs.

Ebenso ist der regelmäßige Verlauf der in 7.8 dargestellten Kurve auffällig. Dieser lässt darauf schließen, dass die angesprochenen Ursachen nicht zufällig auftreten, sondern bestimmte Ursachen bei den Messungen bestimmter Runs dominant waren. Der Verlauf der Daten in Abb. 7.8 hat eine deutliche Ähnlichkeit zu den zeitlichen Verläufen der Mittelwerte von Pedestals und Noise, die im Kapitel 6 behandelt worden sind. Es besteht die Möglichkeit, dass es einen Zusammenhang zwischen diesen Ergebnissen gibt. Die Untersuchung dieses Umstands könnte im Rahmen einer weitergehenden Analyse zukünftig vorgenommen werden.

Um eine Möglichkeit zu finden, die Qualität der Ergebnisse der Analyse zu verbessern, ist es sinnvoll, die analysierten Daten auf einem tiefergehenden Niveau zu betrachten. Das heißt sich mit Ergebnissen einzelner analysierter Events zu beschäftigen. Hier wird

das beispielhaft anhand einiger Events des Runs mit der Nummer 90 vorgenommen. Dieser Run bietet sich an, da das Analyseergebnis bei diesem Run eine ähnliche Übereinstimmung von gemessenem zu erwartetem Common-Mode-Signal aufweist, wie in den kombinierten Ergebnissen der Runs, die in erster Anordnung der FECs und mit einem Gain von 2000 aufgezeichneten wurden. Die Signalverläufe sind ebenfalls sehr ähnlich, wie die Abbildungen 7.9 und 7.7 zeigen.

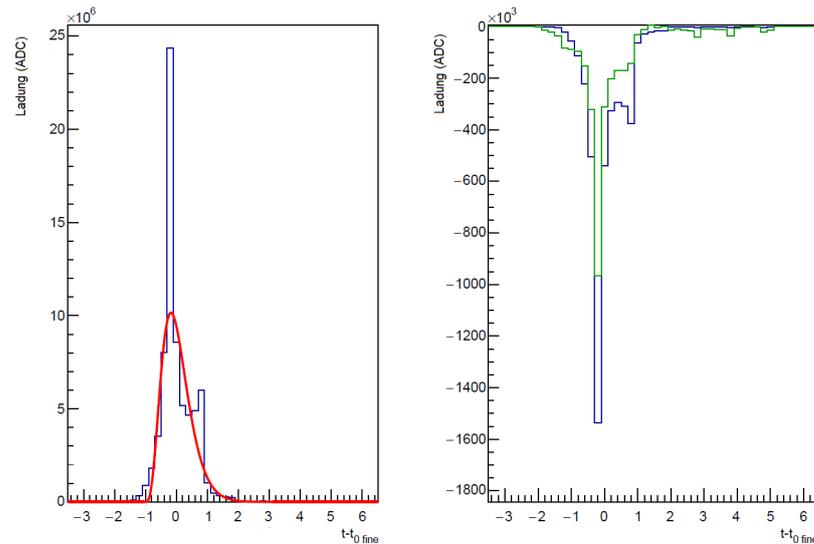


Abbildung 7.9.: Akkumulierte Messsignale von Teilchenspuren (links), des Common Mode Effect (rechts, grün) und das erwartete Common-Mode-Signal (rechts, blau), aufgetragen gegen die Differenz von t_0_{fine} zum jeweiligen Timebin. Die Daten stammen aus Run 90, die gemessenen Signale sind nicht normiert.

Die Abbildung 7.10 zeigt eine Übersicht der integrierten Signale sowohl der Teilchenspur als auch des Common Mode Effect jedes von der Analyse akzeptierten Events aus Run 90.

Die Integrierte Ladung des Common-Mode-Signals eines Events hat nicht dieselbe Größenordnung der integrierten Ladung des Teilchenspursignals von einem Event, da der aktive Bereich nicht die gesamte Auslesezone der IROC umfasst. Der Großteil der gemessenen Ladung der Teilchenspuren (links in Abb. 7.10) liegt im Intervall (1000, 1500).

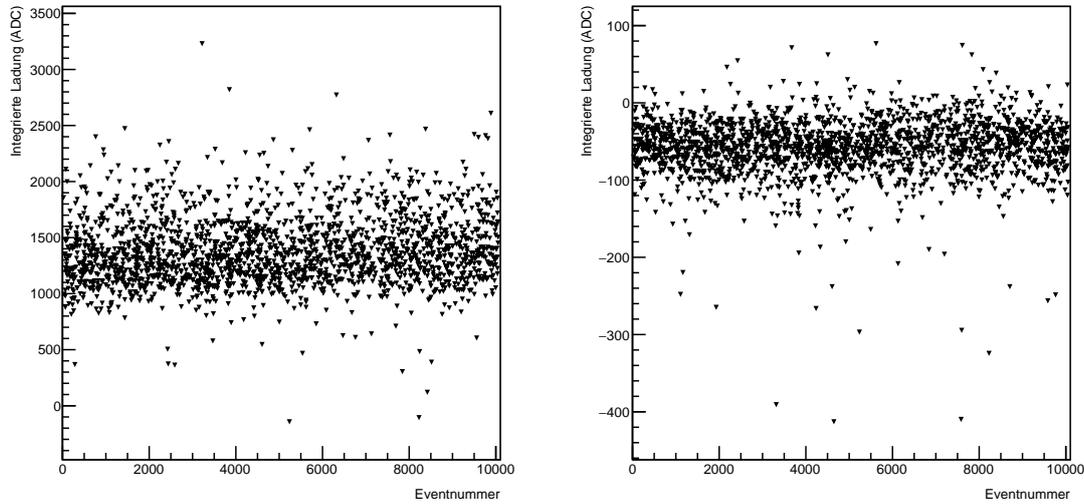


Abbildung 7.10.: Integrierte Ladung von Spur- (links) und Common-Mode-Signalen (rechts) der einzelnen akzeptierten Events von Run 90 aufgetragen gegen die jeweilige Nummer des Events. Die Signale sind nicht normiert.

Der Großteil der Ladung des Common Mode Effect wird demnach im Bereich $(-291, -181)$ erwartet. Dieses Wertintervall ergibt sich aus der Rechnung

$$Q_{\text{Common Mode, aktiver Bereich}} = Q_{\text{Spursignal}} \frac{6 * 5 * 32}{5280}. \quad (7.1)$$

Dabei stehen die Q für den Ladungswert des Common-Mode-Signals bzw. des Signals der Teilchenspur. Eine IROC hat 5280 Auslese pads, der aktive Bereich wurde von sechs FECs, die jeweils fünf SAMPAs haben, die wiederum jeweils 32 Pads auslesen, abgedeckt. Der Hauptteil der Ladungswerte des gemessenen Common Mode (Abb. 7.10, rechts) liegt allerdings im Intervall $(-100, -20)$. Bei einem nicht zu vernachlässigenden Anteil der Events hat der analysierte Common Mode Effect einen Wert von 0 oder sogar einen positiven Ladungsbetrag. Positive Beträge sind durch die Ursache des Common Mode Effect nicht möglich. Beim Spursignal hingegen wird nur einmal ein Wert von ca. 0 und nur zweimal ein negativer Wert, was ebenfalls nicht sinnvoll ist, erreicht. Aufgrund dessen liegt die Schlussfolgerung nah, dass besonders der Common Mode Effect aufgrund noch unbekannter Ursachen unterdrückt wird und daher Erwartung und Messung in den Ergebnissen nicht übereinstimmen.

7. Common Mode Effect

Die Abbildungen 7.11 und 7.12 zeigen exemplarisch das Signal einer Teilchenspur sowie des Common Mode Effect von jeweils einem Event. Diese Events weisen einen positiven Ladungswert nach Integration des Common-Mode-Signals auf.

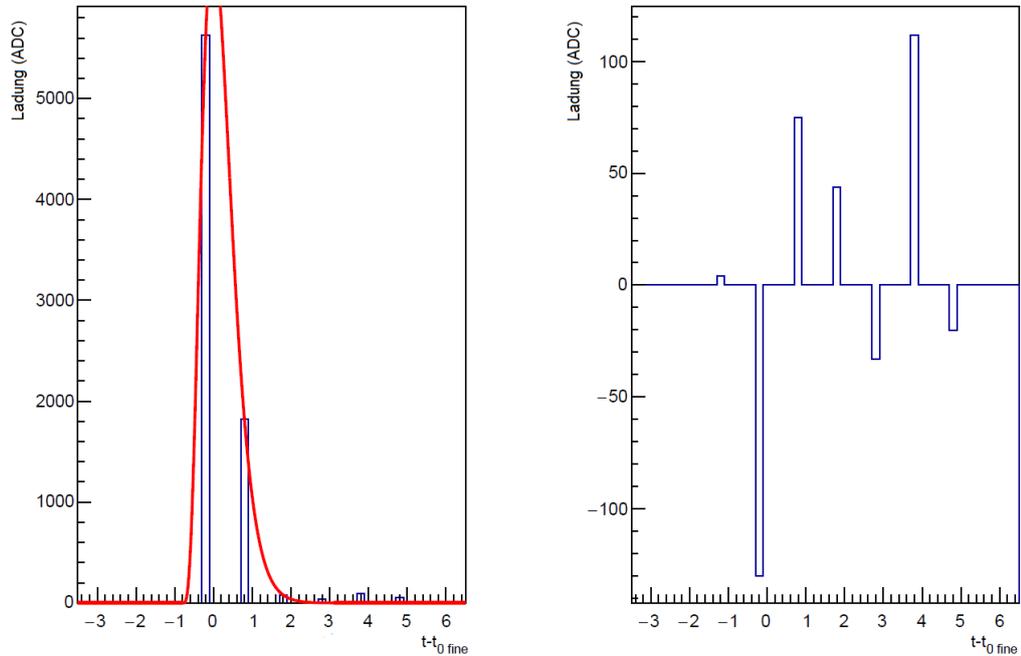


Abbildung 7.11.: Messsignal einer Teilchenspur (links) und des Common Mode Effect (rechts) des Events mit der Nummer 527 aus Run 90, aufgetragen gegen die Differenz von t_0 fine zum jeweiligen Timebin.

Bei beiden Events sind neben dem vermutlich vom Common Mode Effect hervorgerufenen negativem Signal, deutlich positive Signaleinträge in den Histogrammen zu sehen. Diese positiven Signale können größtenteils zeitlich nicht mit Einträgen aus dem Histogramm des Spursignals identifiziert werden. Dahingegen stimmen Spursignal und Common-Mode-Signal zeitlich überein.

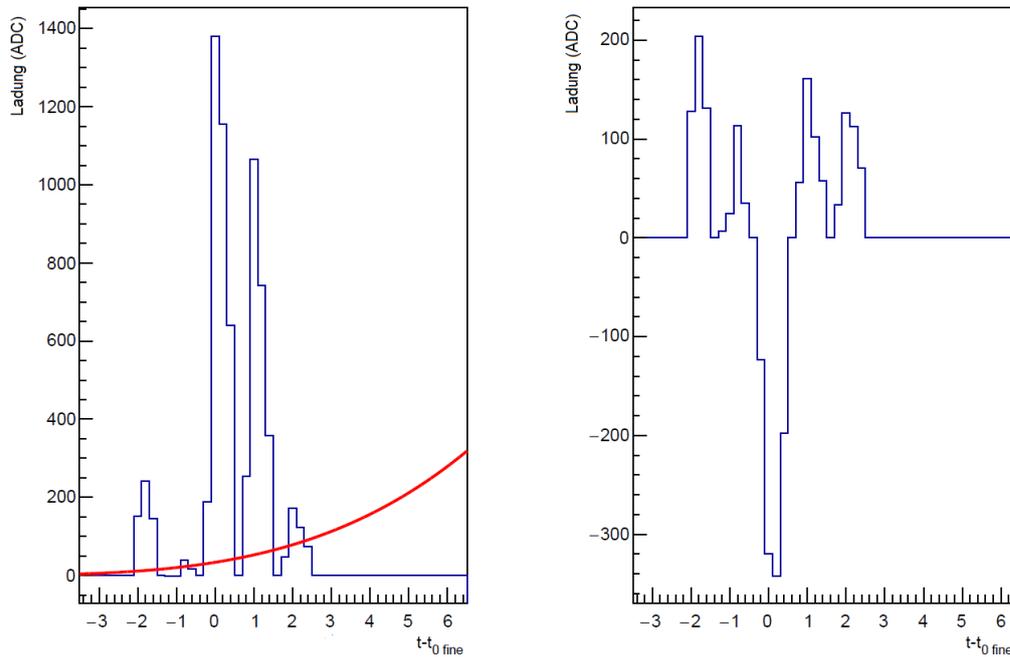


Abbildung 7.12.: Messsignal einer Teilchenspur (links) und des Common Mode Effect (rechts) des Events mit der Nummer 5631 aus Run 90, aufgetragen gegen die Differenz von t_0 *fine* zum jeweiligen Timebin.

Aufschluss für die Ursache geben die Histogramme in den Abbildungen 7.13 und 7.14. Darin sind jeweils drei Grafiken zu sehen mit denen das betreffende Event, auf die Pa-ebene bzw. in die Ebene aus Zeitrichtung und Padreihen projiziert, betrachtet werden kann.

Während bei Event 527 die Lage der Spur in Zeitrichtung durch die lineare Funktion gut beschrieben wird, fallen sehr viele positive Einträge im übrigen untersuchten Gebiet auf, die aber keine Regelmäßigkeit erkennen lassen. In Event 5631 hingegen wird die Teilchenbahn in Zeitrichtung vergleichsweise ungenau erfasst. Die Ursache dafür lässt sich leicht in den Histogrammen oben rechts und unten links in Abb. 7.14 erkennen. Offenbar liegen die Spuren von zwei Teilchen im Abstand von einem Timebin genau übereinander. Der Abstand von einem Timebin ist mit großer Wahrscheinlichkeit nicht ausreichend für die Rekonstruktionssoftware der Cluster, um die Spuren als separat zu erkennen. Daher werden derartige Events nicht durch den Cut auf die Clusterzahl selektiert.

7. Common Mode Effect

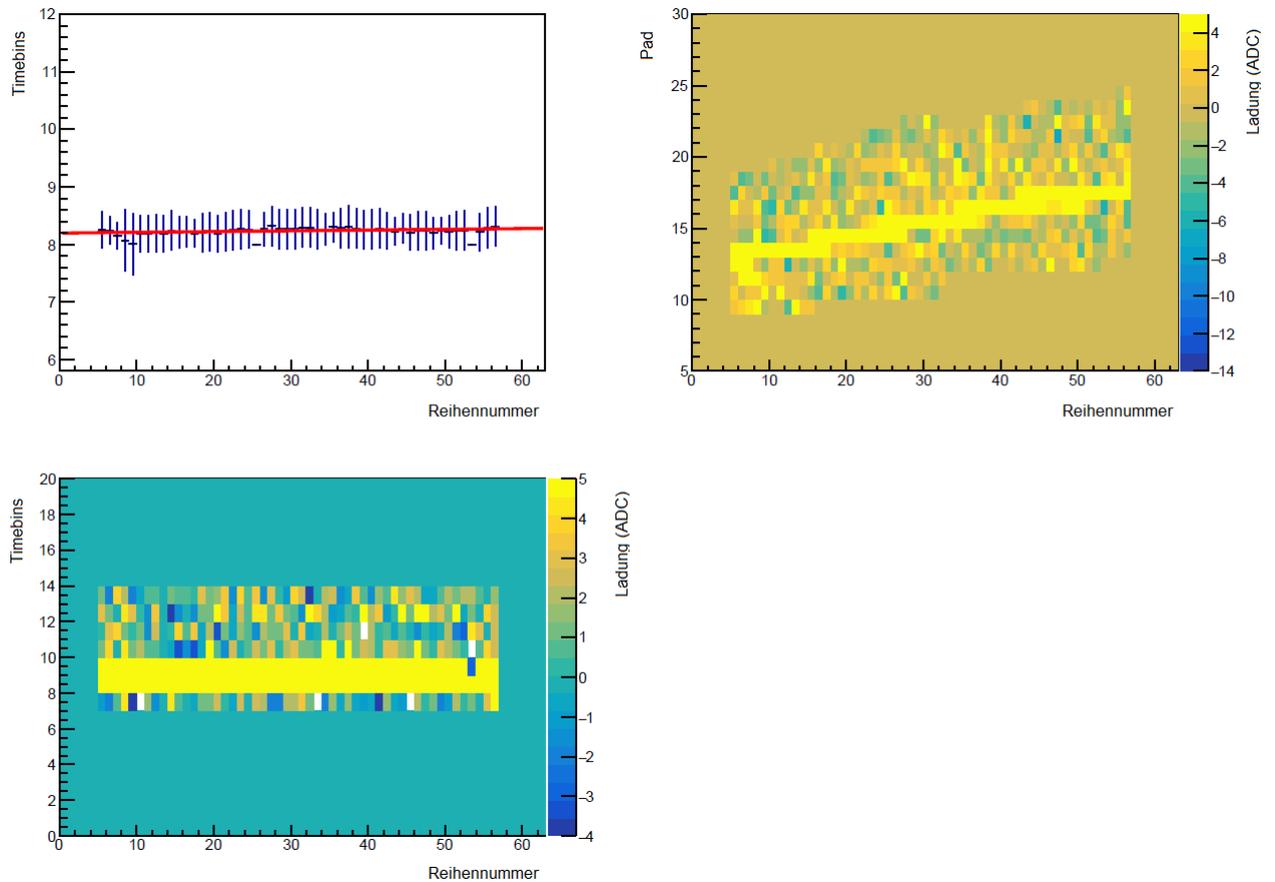


Abbildung 7.13.: Histogramme zum Event 527 aus Run 90. Die Ladungsschwerpunkte in Zeitrichtung innerhalb der jeweiligen Padreihen sowie die Bestimmung des t_0 fine in jeder Padreihe durch lineare Anpassung wird in dem Profilhistogramm links oben dargestellt. Das Histogramm rechts oben zeigt die Ladung der Teilchenspur, sowie die in dem übrigen aktiven Bereich, nachdem alle Cuts angewendet worden sind. Das Histogramm links unten zeigt das gleiche in der Ebene aus Zeitrichtung und Padreihen. Die Grenzen der Skalen letzterer zwei genannter Histogramme, sind so festgelegt worden, dass die hohen Ladungswerte aufgrund der Teilchenspur sowie vereinzelt auftretende, außergewöhnlich negative Messwerte eine genaue Betrachtung des übrigen aktiven Bereichs nicht verhindern.

7.4. Analyseergebnisse zum Common Mode Effect

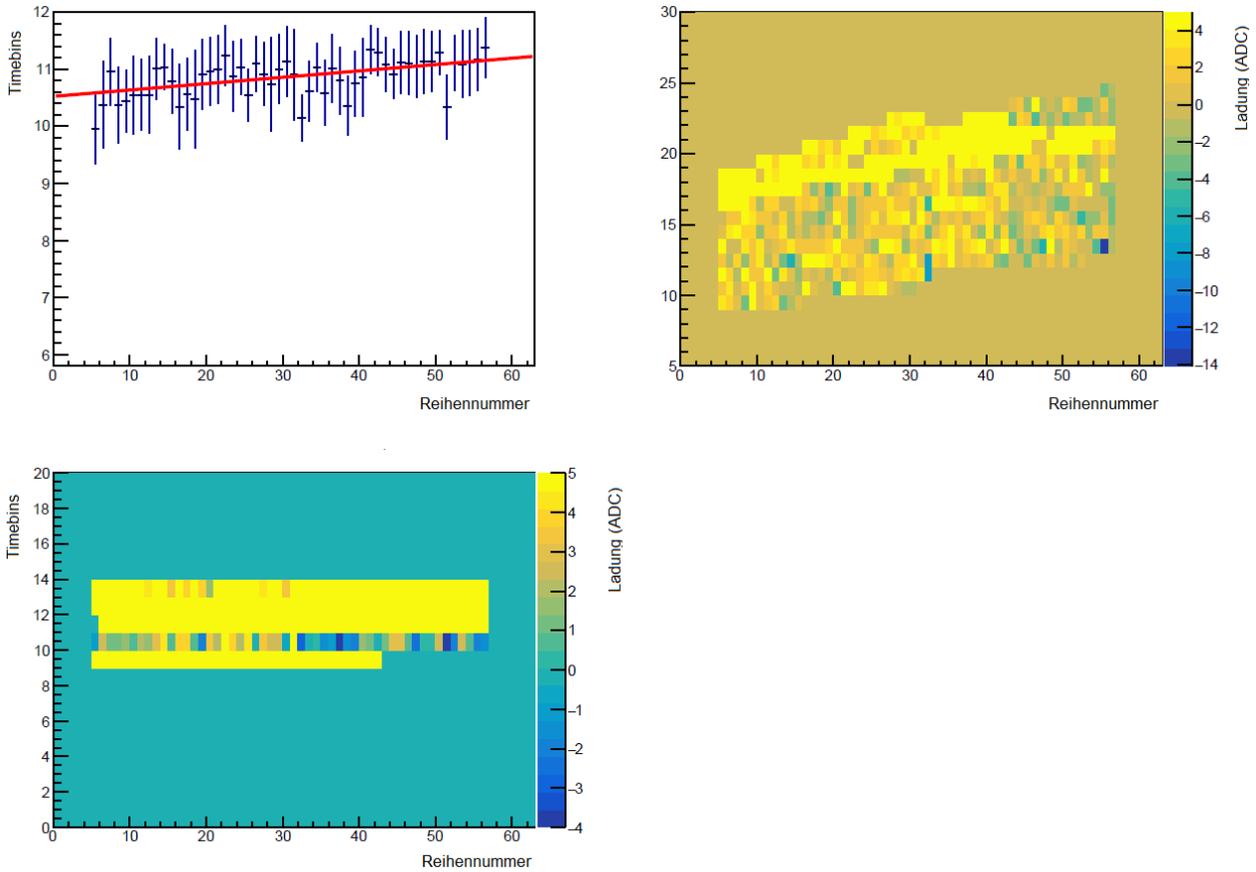


Abbildung 7.14.: Histogramme zum Event 5631 aus Run 90. Die Ladungsschwerpunkte in Zeitrichtung innerhalb der jeweiligen Padreihen sowie die Bestimmung des t_0 fine in jeder Padreihe durch lineare Anpassung wird in dem Profilhistogramm links oben dargestellt. Das Histogramm rechts oben zeigt die Ladung der Teilchenspur, sowie die in dem übrigen aktiven Bereich, nachdem alle Cuts angewendet worden sind. Das Histogramm links unten zeigt das gleiche in der Ebene aus Zeitrichtung und Padreihen. Die Grenzen der Skalen letzterer zwei genannter Histogramme, sind so festgelegt worden, dass die hohen Ladungswerte aufgrund der Teilchenspur sowie vereinzelt auftretende, außergewöhnlich negative Messwerte eine genaue Betrachtung des übrigen aktiven Bereichs nicht verhindern.

Es lässt sich daher sicher schlussfolgern, dass, um die Analyseergebnisse zu verbessern, eine Verfeinerung der Eventselektion vorgenommen werden muss. Dazu müssen neue Selektionskriterien erarbeitet und getestet werden. Dies kann im Rahmen einer künftigen, feineren Analyse erfolgen.

Eine zweite deutliche Auffälligkeit in den Analyseergebnissen hinsichtlich der Signale von Spur und Common Mode ist das Auftreten von Extrema, die genau einen Abstand von einem Timebin zueinander haben. Um dies nachzuvollziehen ist es ausreichend, die Verteilung des $t_{0 \text{ fine}}$ innerhalb des gesamten Bereichs der in der Analyse verwendeten Timebins zu betrachten. Diese findet sich in Abb. 7.15 auf der rechten Seite.

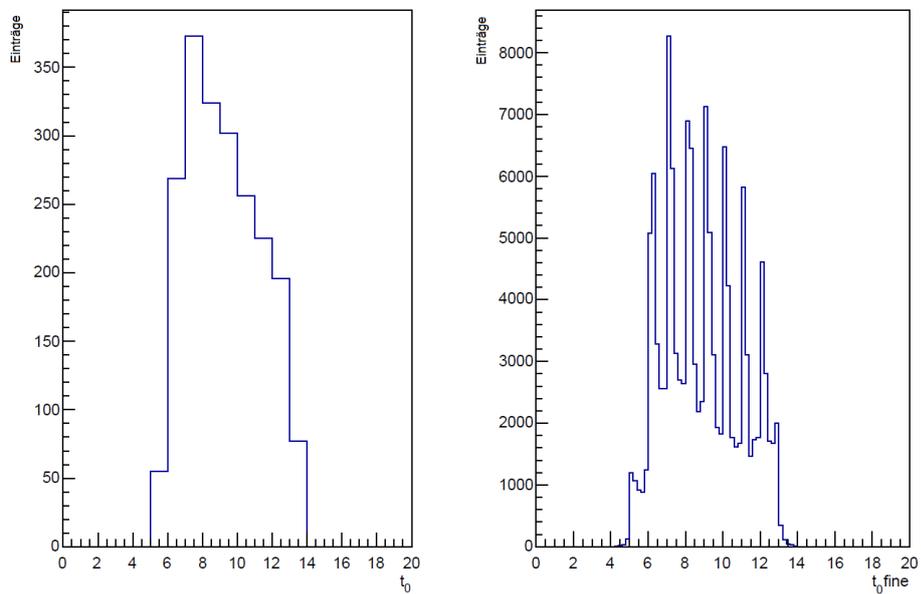


Abbildung 7.15.: Häufigkeitsverteilung von t_0 (links) und $t_{0 \text{ fine}}$ (rechts) innerhalb der akzeptierten Timebins.

In der betreffenden Verteilung zeigt sich eine Peakstruktur, welche sich oberhalb einer Schicht kontinuierlich verteilter $t_{0 \text{ fine}}$ durchsetzt. Diese Struktur deutet sich ebenfalls in der gleichen Verteilung des wesentlich größeren t_0 an, die auf der linken Seite in Abb. 7.15 dargestellt wird. Es besteht die Vermutung, dass es aufgrund der niedrigen Samplingrate von 5 MHz sehr viele Events gibt, bei denen vollständige Signale einer Teilchenspur und daher auch die des Common Mode Effect innerhalb eines einzelnen Timebins liegen [AWRS19]. Aufgrund einer sehr geringen Driftstrecke, da nur eine bloße Kammer einge-

setzt wurde, wie sie sich an den Endflächen der TPC befinden, wirkt wahrscheinlich ein Aliasing-Effekt auf die Zeitkomponente der Messdaten. Dadurch würde so eine gepeakte Zeitstruktur entstehen [LIP19]. Aliasing-Effekte treten bei der Digitalisierung analoger Signale auf und bezeichnen allgemein das Auftreten von Fehlern bei Signalverarbeitung. Diese Effekte stehen in einem Zusammenhang mit Abtastfrequenz und abzutastender Frequenz [KOS03].

Das Problem wird unter denselben Einstellungen der Ausleseelektronik beim Betrieb der ALICE TPC nicht entstehen, da auf der Driftstrecke innerhalb des Detektors longitudinale Ladungsdiffusion stattfindet, die Signale somit in Zeitrichtung verbreitert werden [LIP19].

Die Linearität des Common Mode Effect kann durch die Separation der analysierten Signale nach den Teilchensorten, von denen sie hervorgerufen werden, untersucht werden.

Dafür müssten die Signalstärken der Teilchenspuren von Elektronen und Pionen, den einzigen beiden Teilchenarten in diesem Test, einen signifikanten Unterschied aufweisen. In den vorliegenden Daten ist dieser Fall allerdings nicht gegeben, wie anhand der Abbildungen 7.16 und 7.17 ersichtlich wird. Eine klare Aussage zur Linearität kann daher auf diesem Weg nicht getroffen werden.

Das Spursignal in Abb 7.16 und Abb. 7.17 ist auf ein Event normiert, das gemessene sowie das erwartete Common-Mode-Signal auf ein Auslesepad pro Event.

Die integrierten Ladungswerte von Common Mode und Spur der Runs können an dieser Stelle nicht zur Prüfung der Linearität verwendet werden, aufgrund des Problems deren beeinflusster Signalstärken.

Als letzter Aspekt der vorgenommenen Analyse gilt es, die Homogenität des Common Mode Effect über den gesamten aktiven Bereich innerhalb einer längeren Messdauer zu kontrollieren. In Abb. 7.18 werden zu diesem Zweck die durchschnittlichen Signale des Common Mode Effect pro Event jedes Auslesepads des aktiven Bereichs beider FEC-Settings dargestellt.

Der durchschnittliche Common Mode Effect pro Pad pro Event fluktuiert von Pad zu Pad im Bereich -0.8 ADC bis 0.2 ADC. Dies sind relativ starke Fluktuationen.

Bei den Padnummern -1 und 0 scheint ein Stützkreuz, das innerhalb der Kammern verwendet wird, die Messwerte zu beeinflussen. Zu sehen ist das insbesondere im Bereich der Padreihen 21 bis 47. Die Durchschnittswerte an diesen Koordinaten sind jeweils etwas niedriger als die in deren Umgebung. Hier finden sich auch die niedrigsten Durch-

7. Common Mode Effect

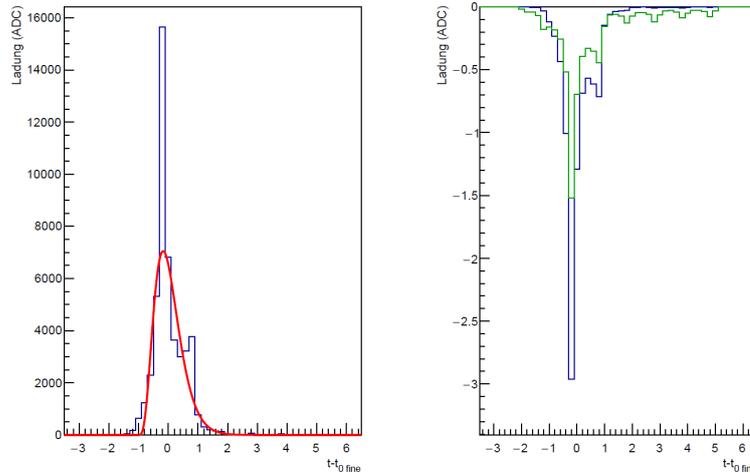


Abbildung 7.16.: Mittleres, normiertes Messsignal einer Spur eines Elektrons (links), des Common Mode Effect (rechts, grün) und das mittlere erwartete Common-Mode-Signal (rechts, blau), aufgetragen gegen die Differenz von $t_{0 \text{ fine}}$ zum jeweiligen Timebin. Die Daten stammen aus sämtlichen Runs, die mit einem Gain von 2000 aufgenommen worden sind.

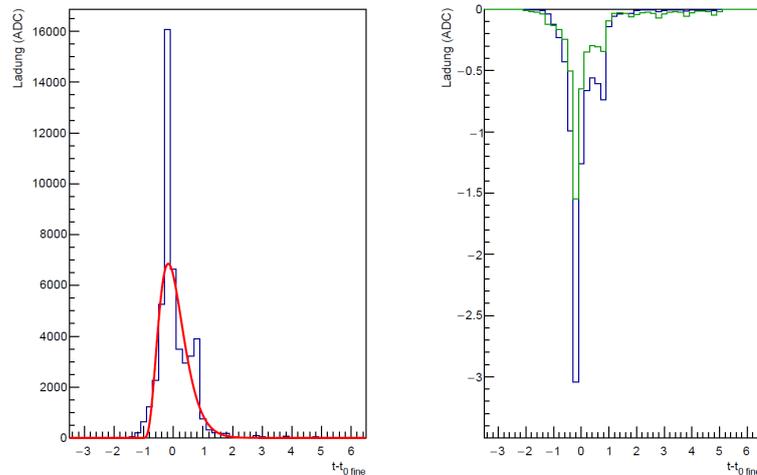


Abbildung 7.17.: Mittleres, normiertes Messsignal einer Pionenspur (links), des Common Mode Effect (rechts, grün) und das mittlere erwartete Common-Mode-Signal (rechts, blau), aufgetragen gegen die Differenz von $t_{0 \text{ fine}}$ zum jeweiligen Timebin. Die Daten stammen aus sämtlichen Runs, die mit einem Gain von 2000 aufgenommen worden sind.

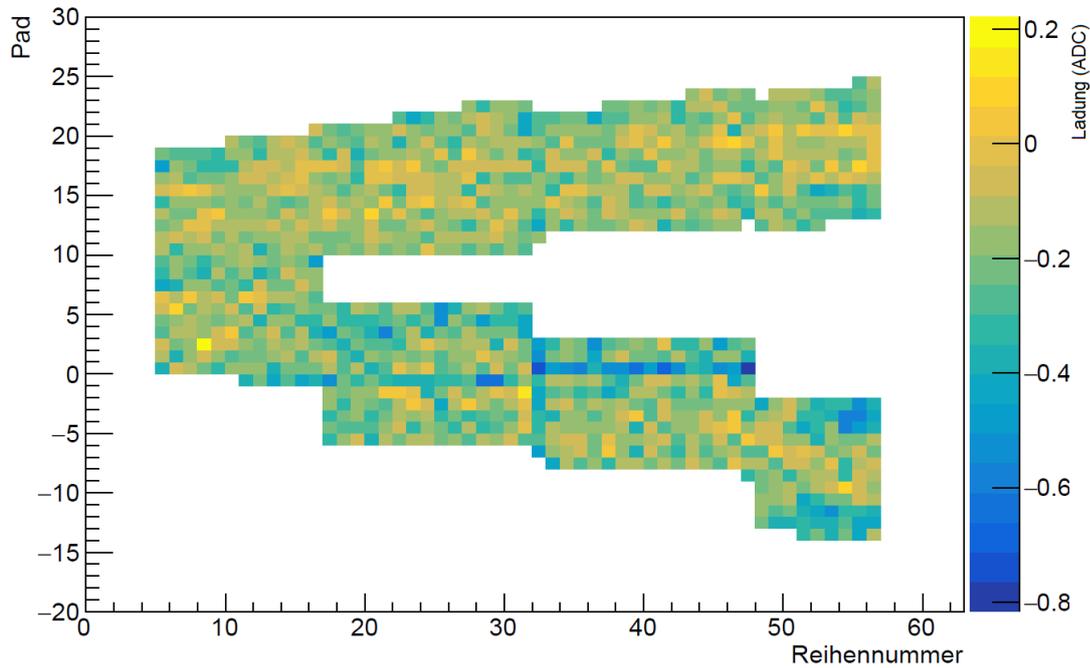


Abbildung 7.18.: Auf ein Event gemittelte, als Common Mode gemessene Signale der ausgelesenen Pads innerhalb der aktiven Bereiche beider FEC-Settings. Die Daten stammen aus sämtlichen Runs, die bei einem Gain von 2000 aufgezeichnet worden sind.

schnittswerte des Common Mode Effect der Pads.

Mit Ausnahme dieser wenigen Pads, treten diese großen Fluktuationen des Common Mode Effect im gesamten aktiven Bereich auf. Die Erwartung an dieser Stelle ist allerdings, dass der Common Mode Effect gleichmäßig über dem gesamten ausgelesenen Bereich verteilt wirkt. Das bedeutet, dass maximal kleine Fluktuationen von Pad zu Pad erwartet werden. Von einer künftigen Analyse, in der eine feinere Eventselektion zum Tragen kommt, wird erhofft diese Erwartung an den Common Mode bestätigen zu können.

Die Abbildungen 7.19 und 7.20 zeigen die Werte aus der Grafik von Abb.7.18 in jeder Padreihe für die Padnummern 17 bzw. -6 .

Der Hauptteil der Werte des Common-Mode-Signals von Pad 17 liegen im Bereich -0.28 ADC bis 0 ADC. Bei Pad -6 hingegen liegen sie im Bereich -0.22 ADC bis -0.05 ADC. Die starken Fluktuationen sind deutlich zu erkennen.

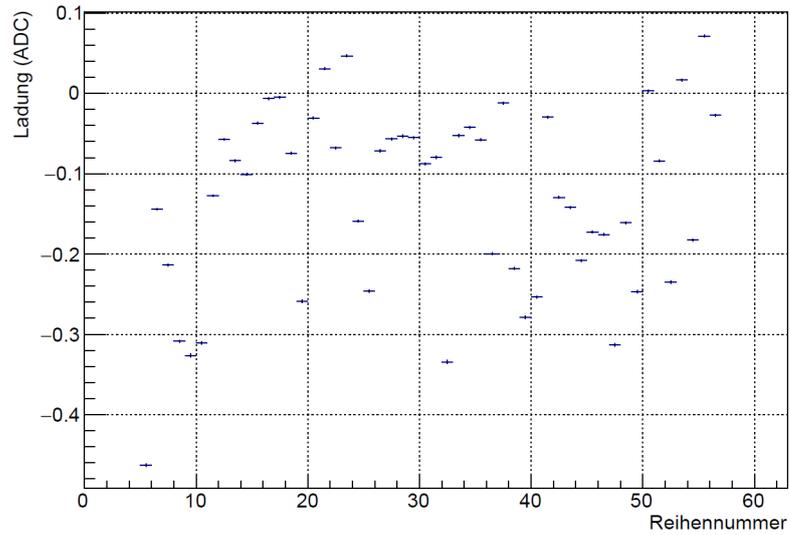


Abbildung 7.19.: Durchschnittliches gemessenes Common-Mode-Signal von Pad Nummer 17 in jeder ausgelesenen Padreihe. Pad 17 lag ausschließlich innerhalb der ersten Anordnung der FECs.

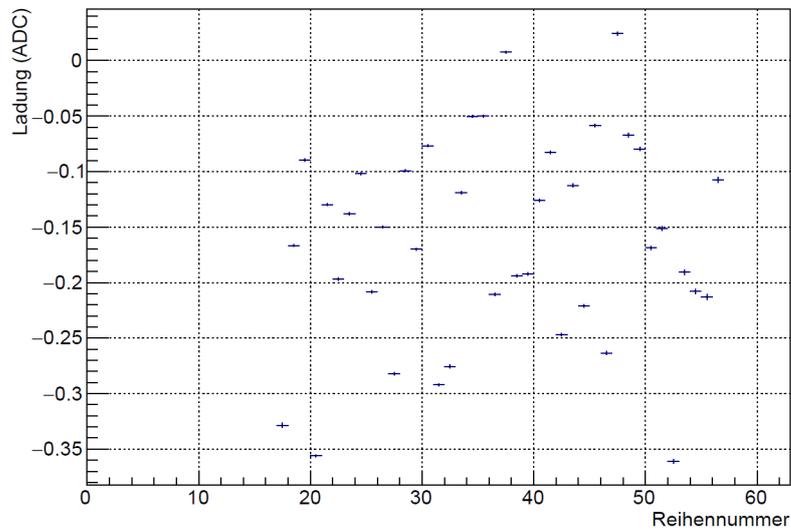


Abbildung 7.20.: Durchschnittliches gemessenes Common-Mode-Signal von Pad Nummer -6 in jeder ausgelesenen Padreihe. Pad -6 lag ausschließlich innerhalb der zweiten Anordnung der FECs.

8. Zusammenfassung

In den Jahren 2019 und 2020 wird das ALICE Experiment aufgerüstet, um ab der Run-3-Betriebsperiode des Large Hadron Collider am CERN dessen deutlich erhöhter Interaktionsrate entsprechend viele Messdaten gewinnen zu können. In dieser Phase sind Umbaumaßnahmen an der Time Projection Chamber des Experiments nötig, während denen die Vieldrahtproportionalkammern der bis Ende 2018 eingesetzten Auslese durch GEM-basierte Auslesekkammern ersetzt werden und die Ausleseelektronik erneuert wird. Es gilt das Betriebsverhalten sowie charakteristische Größen dieser neuen Auslesekkette vor dem regulären Messeinsatz zu testen. Zu diesem Zweck wurde im Mai 2017 ein Kammerprototyp, teilbestückt mit neuer Ausleseelektronik, am Proton Synchrotron des CERN im Rahmen eines Beamttests eingesetzt.

In dieser Arbeit sollten die zwei Aspekte Pedestals und Noise sowie der Common Mode Effect und dessen Eigenschaften untersucht werden. In der Fragestellung bezüglich der Pedestals und des Noise ging es um die Mittelwerte, die zeitliche Stabilität der Mittelwerte sowie Fluktuationen auf Auslesepadniveau dieser beiden Größen. Vor allem der Mittelwert des Noise war von Interesse, aufgrund der Anforderung an das Design der neuen Auslese einen Noise von maximal einem ADC einzuhalten. Dieser Anforderung konnte beim Testbeam schon fast genügt werden. Eine spätere Messung mit neuen Verbindungskabeln ergab, dass dieses Ziel erfüllt ist. Pedestals und Noise verändern sich während des Zeitraums des Tests nur aufgrund von Umwelteinflüssen, denen die Detektoren des ALICE Experiments später nicht ausgesetzt sein werden. Die lokalbezogenen Fluktuationen beider Größen sind bei den Auslesepads gering.

Bei der Untersuchung des Common Mode Effect war dessen Signalform und -größe, seine Linearität sowie Homogenität innerhalb des ausgelesenen Bereichs des Kammerprototypen von Interesse. Die in der Analyse gewonnenen Ergebnisse zeigen eine Signalgröße und -form des Common Mode, die so den Erwartungen nicht entsprechen. Eine tiefer gehende Suche nach Ursachen für diesen Umstand legte zum einen eine Peakstruktur in der Zeitverteilung der Spursignale sowie des Common Mode Signals offen und zeigte vor allem Fremdsignale in vielen Events, die besonders die Signale des Common Mode Effect verzerren. Ebenso waren Events mit mehr als einer detektierten Teilchenbahn zu sehen. Daraus folgt, dass die Eventselektion noch mithilfe neuer Kriterien verfeinert

werden muss, um in einem späteren Verlauf diese Analyse zu verbessern. Aufgrund der beeinflussten Messsignale kann über die Linearität des Common Mode Effect der neuen Ausleseammern keine Aussage getroffen werden. Dies gilt aus denselben Gründen für eine Aussage über die Homogenität des Common Mode Effect innerhalb des aktiven Bereichs.

Neben einer künftigen, verbesserten Untersuchung des Common Mode Effect kann ebenfalls die Untersuchung der Peakstruktur in der Zeitverteilung der Messsignale sowie die deutliche Ähnlichkeit des zeitlichen Verhaltens von Pedestals und Noise zum Verlauf des Verhältnisses aus gemessenem zum analysierten Common Mode Signal der Runs von Interesse sein.

A.

Anhang

Hier im Anhang finden sich die aus mehreren Runs zu einem Ergebnis kombinierten Messresultate der eingestellten Gains 1000, 1500 und 3000, auf die in Kapitel 7 verwiesen wurde. Die betreffenden Runs wurden jeweils mit der ersten FECanordnung aufgezeichnet. Daher finden sich in hier keine nach den FECsettings aufgeteilten Ergebnisse.

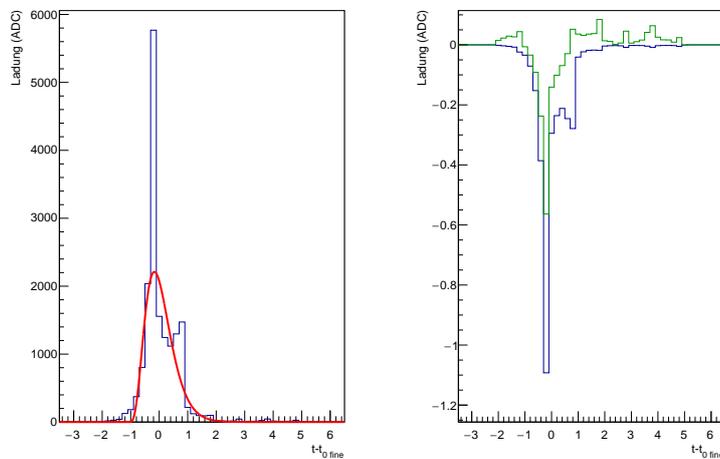


Abbildung A.1.: Signal einer Spur (links) und des Common Mode (rechts, grün) sowie erwartetes Common-Mode-Signal (rechts, blau). Der eingestellte Gain beträgt 1000.

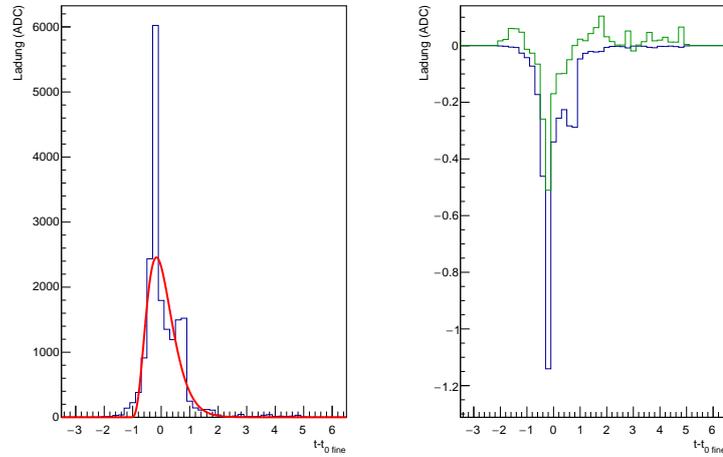


Abbildung A.2.: Signal einer Elektronenspur (links) und des Common Mode (rechts, grün) sowie erwartetes Common-Mode-Signal (rechts, blau). Der eingestellte Gain beträgt 1000.

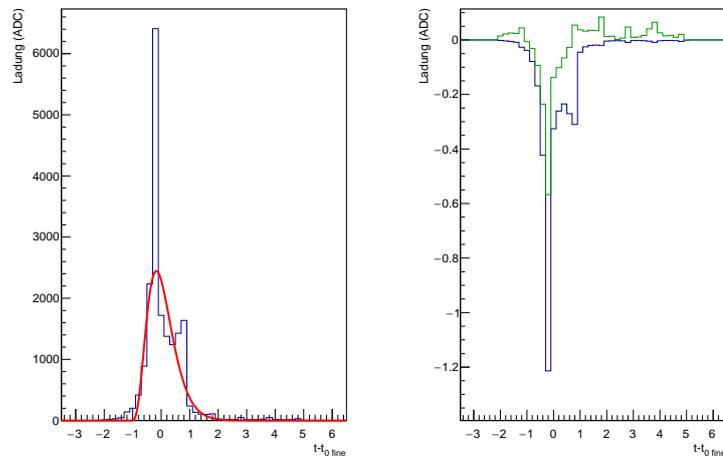


Abbildung A.3.: Signal einer Pionenspur (links) und des Common Mode (rechts, grün) sowie erwartetes Common-Mode-Signal (rechts, blau). Der eingestellte Gain beträgt 1000.

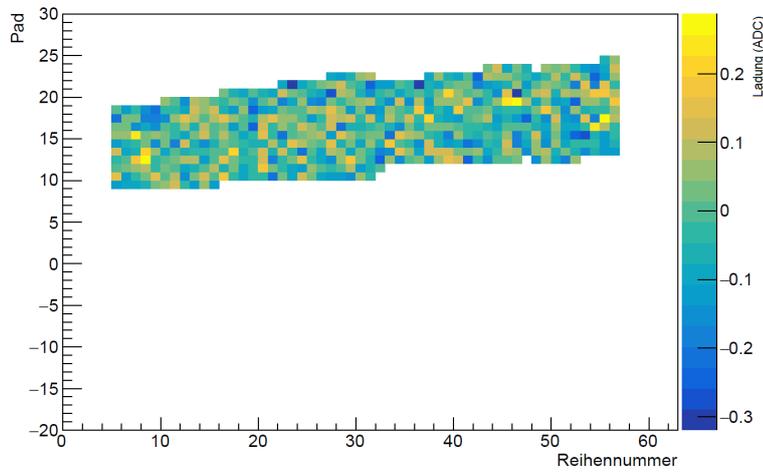


Abbildung A.4.: Auf ein Event gemittelte, als Common Mode gemessene Signale der ausgelesenen Pads innerhalb des aktiven Bereichs. Der eingestellte Gain beträgt 1000.

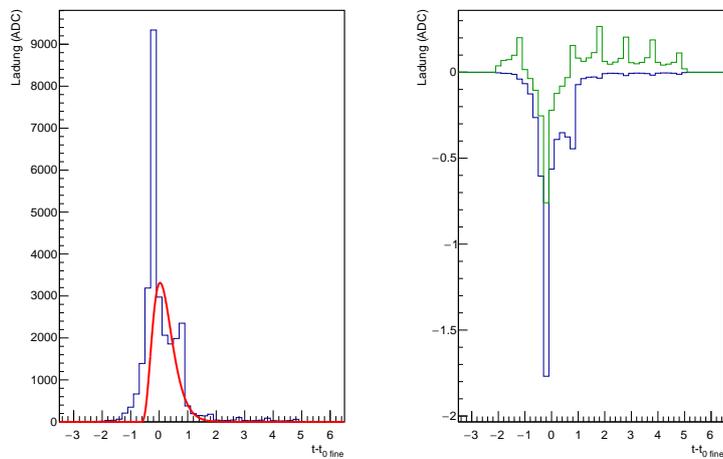


Abbildung A.5.: Signal einer Spur (links) und des Common Mode (rechts, grün) sowie erwartetes Common-Mode-Signal (rechts, blau). Der eingestellte Gain beträgt 1500.

A.

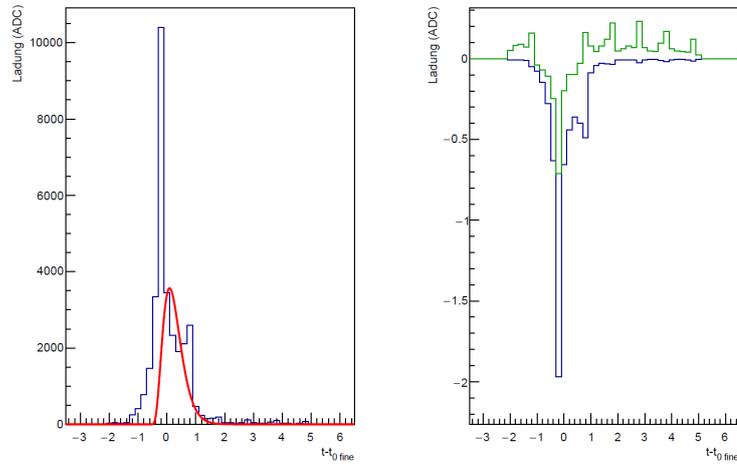


Abbildung A.6.: Signal einer Elektronenspur (links) und des Common Mode (rechts, grün) sowie erwartetes Common-Mode-Signal (rechts, blau). Der eingestellte Gain beträgt 1500.

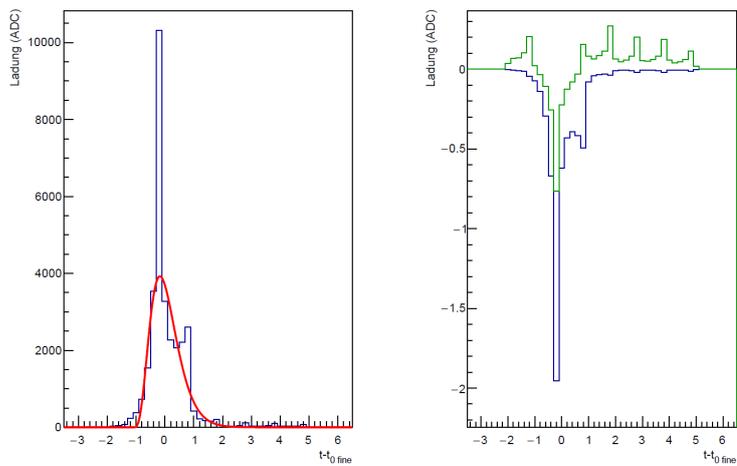


Abbildung A.7.: Signal einer Pionenspur (links) und des Common Mode (rechts, grün) sowie erwartetes Common-Mode-Signal (rechts, blau). Der eingestellte Gain beträgt 1500.

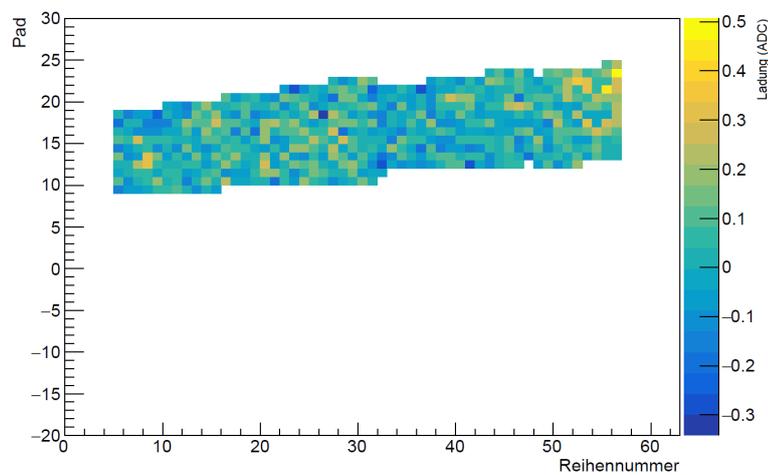


Abbildung A.8.: Auf ein Event gemittelte, als Common Mode gemessene Signale der ausgelesenen Pads innerhalb des aktiven Bereichs. Der eingestellte Gain beträgt 1500.

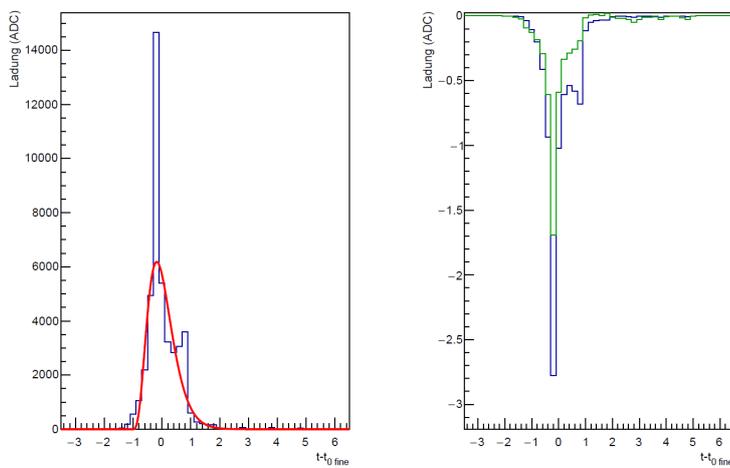


Abbildung A.9.: Signal einer Spur (links) und des Common Mode (rechts, grün) sowie erwartetes Common-Mode-Signal (rechts, blau). Der eingestellte Gain beträgt 3000.

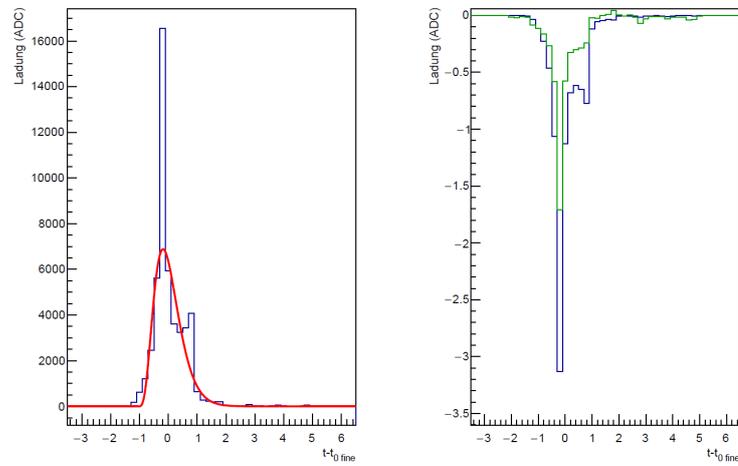


Abbildung A.10.: Signal einer Elektronenspur (links) und des Common Mode (rechts, grün) sowie erwartetes Common-Mode-Signal (rechts, blau). Der eingestellte Gain beträgt 3000.

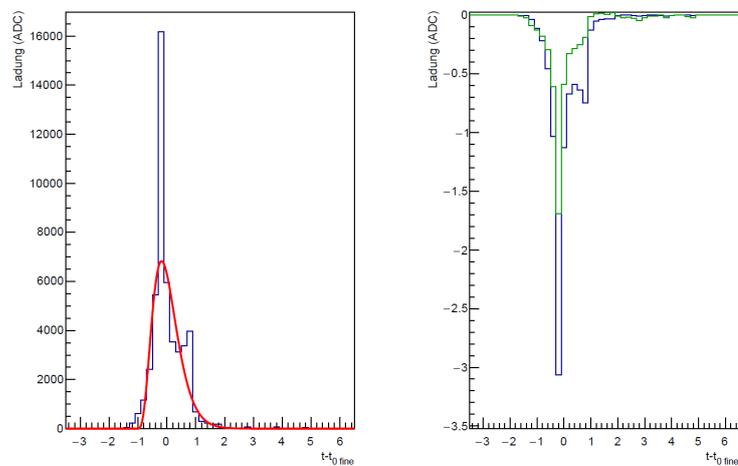


Abbildung A.11.: Signal einer Pionenspur (links) und des Common Mode (rechts, grün) sowie erwartetes Common-Mode-Signal (rechts, blau). Der eingestellte Gain beträgt 3000.

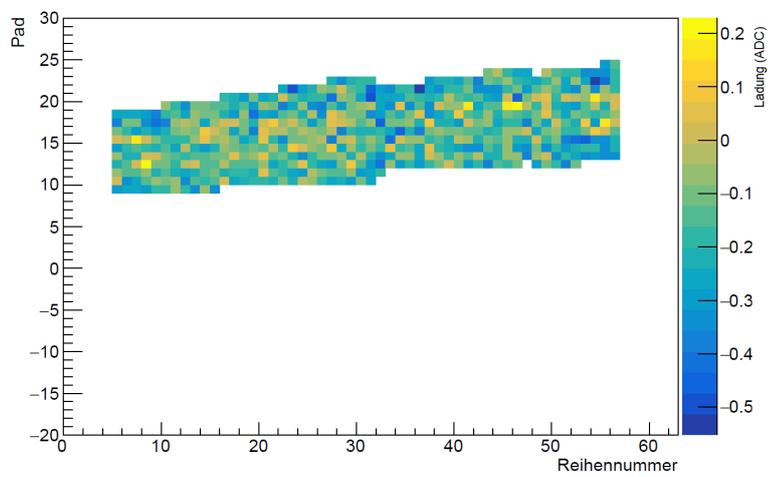


Abbildung A.12.: Auf ein Event gemittelte, als Common Mode gemessene Signale der ausgelesenen Pads innerhalb des aktiven Bereichs. Der eingestellte Gain beträgt 3000.

Literaturverzeichnis

- [CERN18] home.cern/about. *About CERN*.
<http://home.cern/about>, 2018
- [JINST08I] 2008 Jinst 3 S08001, 2008
- [JINST08II] 2008 Jinst 3 S08002, 2008
- [ALICE08] Aliceinfo.cern.ch. *The Alice Experiment*.
<http://aliceinfo.cern.ch/Public/en/Chapter2/Chap2InsideAlice-en.html>
- [HA17] H. Appelshäuser. Private Weitergabe von Skizzen zum ALICE TPC Upgrade, 03.2017
- [NIMA10] The ALICE Collaboration: *The ALICE TPC, a large 3-dimensional tracking device with fast readout for ultra-high multiplicity events*. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research, A 622, S. 316 - 367, 07.2010
- [ALICE14] The LHC experiments Committee: *Technical Design Report for the Upgrade of the ALICE Time Projection Chamber*.
<https://cds.cern.ch/record/1622286>, 03.2014
- [LMO05] LHC-machine-outreach.web.cern.ch. *CERN Accelerators*.
<https://lhc-machine-outreach.web.cern.ch/lhc-machine-outreach/images/complex/Cern-complex.gif>, 11.2005
- [ALICE17] Aliceinfo.cern.ch. *THE ALICE DETECTOR*.
https://aliceinfo.cern.ch/Figure/sites/aliceinfo.cern.ch/Figure/files/Figures/General/atauro/2017-May-11-ALICE_RUN2_labels_HD.png, 05.2017
- [GSI03] GSI. *Multiwire proportional drift chambers; Alice TPC - Sketch*.
<https://web-docs.gsi.de/~andronic/physics/gas/gas.html>, 01.2003

- [TCLAE09] CERN. *THE CERN Large Hadron Collider: Accelerator and Experiments, Volume 1: LHC Machine, ALICE and ATLAS*. Edited by Amos Breskin and Rüdiger Voss. 2009
- [HEL15] E. Hellbär: *Ion Movement and Space-Charge Distortions in the ALICE TPC*. Goethe Universität Frankfurt am Main, 10.2015
- [PRSZ09] B. Povh, K. Rith, C. Scholz, F. Zetsche: *Teilchen und Kerne*. 8. Auflage, Springer, 06.2009
- [PO17] Physics.openmetric.org. *Review of Standard Model for Particle Physics*.
<http://physics.openmetric.org/cosmology/thermal-history.html>, 2017
- [WKW18] Wikiwand.com. *Nuclear force*
http://www.wikiwand.com/en/Nuclear_force, 08.2018
- [StWDP10] S. Stohl. *CBM - Suche im Quark-Gluon-Plasma*.
<http://www.weltderphysik.de/gebiet/teilchen/experimente/teilchenbeschleuniger/fair/cbm-experiment/>, 12.2010
- [BRTPJ12] C. Blume, K. Rabbertz, S. Tapprogge: *Die starke Seite des LHC*. Physik Journal, S. 45 - 49, WILEY-VCH, 04.2012
- [CLu] C. Lippmann. *Common Mode Effect*. Präsentationsfolien, privat zugesendet. unbekanntes Datum
- [TA17] T. ALT. Folie aus Präsentation in einem wöchentlichen TPC-Upgrade online Meeting, privat zugesendet. 2017
- [LIP18] C. Lippmann. Folie aus Präsentation in einem wöchentlichen TPC online Meeting
<https://indico.cern.ch/event/714661/contributions/2970280/>, 03.2018
- [AWRS19] Diskussion im lokalen TPC Meeting der Arbeitsgruppe mit H. Appelshäuser, J. Wiechula und R. Renfordt, 02.2019
- [LIP19] C. Lippmann. Private Kommunikation zur Ursache der Peakstruktur der t_0 fine Verteilung. 02.2019
- [KOS03] M.Kostic. *Sampling and Aliasing: An Interactive and On-Line Virtual Experiment*. Northern Illinois University, Session 3659, 2003

Danksagung

Ich möchte mich an dieser Stelle bei der gesamten High Energy Group Frankfurt für Unterstützung bei Problemen und Fragen und das positive Arbeitsklima bedanken. Auch denjenigen, die diese Arbeit korrekturgelesen haben, möchte ich ganz herzlich danken.

Besonders danke ich hiermit:

- Prof. Dr. Harald Appelshäuser für die Möglichkeit meine Masterarbeit in seiner Arbeitsgruppe am IKF zu schreiben, für das interessante und lehrreiche Thema sowie die damit verbundene Möglichkeit am CERN direkt Erfahrungen und Eindrücke zu sammeln.
- Dr. Jens Wiechula für die Beantwortung sämtlicher Fragen und der Hilfe beim Lösen von auftretenden Problemen während dieser Arbeit sowie seine umfangreichen und guten Erklärungen, seine vielen Anregungen und den Fertigkeiten, die ich von ihm lernen konnte.
- Dr. Rainer Renfordt für viele Anregungen und Erklärungen rund um Experiment und Beamtest sowie viele interessante Gespräche über die verschiedensten Themen.
- Dr. Christian Lippmann für seine Unterstützung, während meiner Zeit am CERN, für die vielen Fertigkeiten, die ich von ihm lernen konnte, sowie seiner Hilfe beim klären auftretender Fragen in der Analyse.
- Dr. Torsten Alt für ausführliche Erklärungen und interessante Unterhaltungen während meiner Zeit am CERN.
- Dr. Alexander Deisting für seine Unterstützung und interessante Gespräche, während meiner Zeit am CERN
- Meiner Familie und meinem gesamten Freundeskreis für die Unterstützungen jeglicher Art auf dem Weg hin zu und während der Entstehung dieser Arbeit.
- Prof. Dr. Christoph Blume für sein bereit Erklären als Zweitgutachter.
- Michael Czaja, Lucas Westermann und Anton Werth für viele sehr unterhaltsame Freizeitaktionen sowie gute Ratschläge.
- Denjenigen, die sich während meiner Zeit als Masterstudent am IKF ein Büro mit mir geteilt haben: Andrea Hornung, Joshua König, Matthias Kleiner, Gabriel

Danksagung

Porebski, Charlotte Asal, Lucas Westermann, Alexej Kraiker und Michaela Peter.
Das Arbeitsklima im Büro war dank euch immer sehr gut. Jederzeit würde ich mir
mit euch wieder das Büro teilen.

Erklärung nach §30 (12) Ordnung für den Bachelor- und den Masterstudiengang

Hiermit erkläre ich, dass ich die Arbeit selbstständig und ohne Benutzung anderer als der angegebenen Quellen und Hilfsmittel verfasst habe. Alle Stellen der Arbeit, die wörtlich oder sinngemäß aus Veröffentlichungen oder aus anderen fremden Texten entnommen wurden, sind von mir als solche kenntlich gemacht worden. Ferner erkläre ich, dass die Arbeit nicht - auch nicht auszugsweise - für eine andere Prüfung verwendet wurde.

Frankfurt am Main, 28. März 2019

(Hendrik Schulte)