

Simulation der Detektorantwort von MAPS auf einzelne Schauerteilchen

Bachelorarbeit

vorgelegt von

Jan Schöngarth

Institut für Kernphysik
Fachbereich Physik
Goethe Universität Frankfurt

März 2022

1. Gutachter : Prof. Dr. Henner Büsching

2. Gutachter : Tim Rogoschinski

Datum des Einreichens der Arbeit: 17. März 2022

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
2	Theoretische Grundlagen	3
2.1	Wechselwirkung mit Materie	3
2.2	Elektromagnetischer Schauer	6
2.3	Hintergrund von FoCal	7
3	Experimenteller Aufbau	9
3.1	Aufbau von FoCal	9
3.2	Aufbau und Funktionsweise von ALPIDE	10
3.3	Zweck und Aufbau von EPICAL-2	11
3.4	Datennahme mit EPICAL-2	12
3.5	Allpix ²	13
4	Analyse	15
4.1	Parameter der Simulation	15
4.2	Definition der Detektorantwort	17
4.3	Energieabhängigkeit der Detektorantwort	17
4.4	Positionsabhängigkeit der Detektorantwort	21
4.5	Winkelabhängigkeit der Detektorantwort	23
4.6	Die Häufigkeit von Clusterformen	24
4.7	Vergleich zu Daten von EPICAL-2	29
4.8	Einfluss der Pixelgeometrie	31
4.9	Parametrisierung von Clustern	33

5 Zusammenfassung und Ausblick	38
Quellenverzeichnis	40

Kapitel 1

Einleitung

In der Teilchenphysik werden Elementarteilchen, bei denen es sich um die kleinsten Bausteine des Universums handelt, sowie deren Wechselwirkungen erforscht. Die gesamte Materie des Universums setzt sich aus ihnen zusammen. Das Standardmodell der Teilchenphysik beschreibt alle bekannten Elementarteilchen und die fundamentalen Wechselwirkungen. Die Teilchenphysik erforscht nicht nur den Aufbau der Materie des Universums in seinem aktuellen Zustand, sondern versucht auch die Entwicklung des frühen Universums kurz nach dessen Entstehung zu beschreiben. Es wird angenommen, dass das Universum kurz nach dem Urknall sehr heiß war und sich in einem speziellen Materiezustand befand: dem Quark-Gluon-Plasma. Das Quark-Gluon-Plasma ist ein Zustand der starken Wechselwirkung, einer der fundamentalen Wechselwirkungen, der bei extrem hohen Temperaturen oder Teilchendichten erreicht wird. Im Quark-Gluon-Plasma können Quarks, die stark wechselwirken, quasi-frei existieren. Dieser Materiezustand kann mit Hilfe von Teilchenbeschleunigern untersucht werden.

Der LHC ist der größte Teilchenbeschleuniger der Welt und befindet sich am europäischen Kernforschungszentrum CERN in Genf. Der LHC beschleunigt Teilchen auf einer Kreisbahn in entgegengesetzter Richtung, um sie mit nahezu Lichtgeschwindigkeit zur Kollision zu bringen. Es wird angenommen, dass bei der Kollision schwerer Atomkerne für sehr kurze Zeit ein Quark-Gluon-Plasma entsteht. Bei dem ALICE-Experiment handelt es sich um ein Experiment am LHC-Beschleuniger, das darauf spezialisiert ist, das Quark-Gluon-Plasma zu erforschen. Weder die Kollision noch

das Quark-Gluon-Plasma können direkt beobachtet werden. Lediglich die dabei produzierten Teilchen werden mit Hilfe von Detektoren untersucht. Deshalb verwenden Experimente wie das ALICE-Experiment eine Vielzahl von Detektoren.

Im Jahr 2026 wird in das ALICE-Experiment das FoCal eingebaut werden. Dabei handelt es sich um einen neuen Detektor. Im Rahmen der Entwicklung von FoCal wurde der Detektor-Prototyp EPICAL-2 gebaut, um einen Sensorchip für FoCal zu testen. EPICAL-2 ist ein Detektor, der aus mehreren dieser Chips besteht. Es werden verschiedene Testmessungen durchgeführt, um EPICAL-2 zu verstehen und um zu zeigen, dass der Sensorchip die gestellten Anforderungen für FoCal erfüllt.

Zum besseren Verständnis von EPICAL-2 wird in dieser Arbeit die Detektorantwort des Sensorchips mit Hilfe von Computersimulationen untersucht.

Dazu werden zunächst in Kapitel 2 die nötigen theoretischen Grundlagen erläutert. Im Anschluss wird in Kapitel 3 der Aufbau von FoCal, EPICAL-2, sowie die Funktionsweise des untersuchten Sensorchips erläutert. Die Untersuchung der Detektorantwort dieses Chips erfolgt in Kapitel 4. Zuletzt werden die diskutierten Ergebnisse der Analyse in Kapitel 5 zusammengefasst und ein Ausblick auf mögliche nachfolgende Analysen gegeben.

Kapitel 2

Theoretische Grundlagen

In diesem Kapitel werden die Wechselwirkungen von Teilchen mit Materie diskutiert, wobei im Speziellen auf die elektromagnetische Wechselwirkung sowie die Bildung von elektromagnetischen Schauern näher eingegangen wird. Da in dieser Arbeit die Detektorantwort eines Sensorchips auf einzelne Teilchen eines elektromagnetischen Schauers diskutiert wird, trägt dieses Wissen zum Verständnis der Detektion der Teilchen durch den Sensorchip bei.

2.1 Wechselwirkung mit Materie

Teilchen können gemessen werden, da sie mit Materie wechselwirken. Bewegt sich beispielsweise ein Elektron oder Positron durch Materie, finden zwei Effekte statt: Bremsstrahlung und Ionisation. Bremsstrahlung bezeichnet den Prozess, bei dem das Teilchen durch die elektromagnetischen Felder der Atome im Detektormaterial beschleunigt wird und dabei ein Photon abstrahlt. Das Teilchen bewegt sich anschließend mit veränderter Richtung und verringerter Energie fort. Die Ionisation bezeichnet das Herauslösen von Hüllenelektronen aus den Atomen der Materie durch das elektrische Feld des Teilchens. Der Energieübertrag zwischen den beiden Teilchen muss groß genug sein, sodass die Energie des Hüllenelektrons die Ionisationsenergie des Atoms übersteigt. Das entstandene freie Elektron kann detektiert werden. Bei dem Positron handelt es sich um das Antiteilchen des Elektrons. Trifft ein Positron auf ein Elektron, kann es zur Elektron-Positron-Annihilation kommen. Bei diesem Prozess wandeln sich

die beiden Teilchen in ein Photon um. Abbildung 2.1 stellt den spezifischen Energieverlust von Elektronen in Silizium dar. Unterhalb der Energie $E_k = 47.86 \text{ MeV}$ findet der Energieverlust hauptsächlich durch Ionisation statt. Oberhalb dieser Energie dominiert die Bremsstrahlung. In dem dargestellten Energiebereich von 1 MeV bis 10 GeV nimmt der Energieverlust mit steigender Energie zu.

Bewegt sich ein Photon durch Materie, finden die folgenden Wechselwirkungen statt: der Comptoneffekt, der photoelektrischen Effekt und die Photonkonversion. Sowohl beim Comptoneffekt als auch beim photoelektrischen Effekt trifft das Photon auf ein Hüllenelektron. Während das Photon beim Comptoneffekt gestreut wird und nur einen Teil seiner Energie abgibt, wird es beim photoelektrischen Effekt absorbiert und das Hüllenelektron erhält genügend Energie zum Verlassen des Atoms. Die Photonkonversion beschreibt die Umwandlung eines Photons in ein Elektron-Positron-Paar in der Nähe eines Atomkerns. Dieser Prozess wird auch Paarerzeugung genannt und wird häufig ausgenutzt, um Photonen zu messen. Jeder dieser Prozesse findet mit einer gegebenen Wahrscheinlichkeit statt. Abbildung 2.2 stellt den Wirkungsquerschnitt der

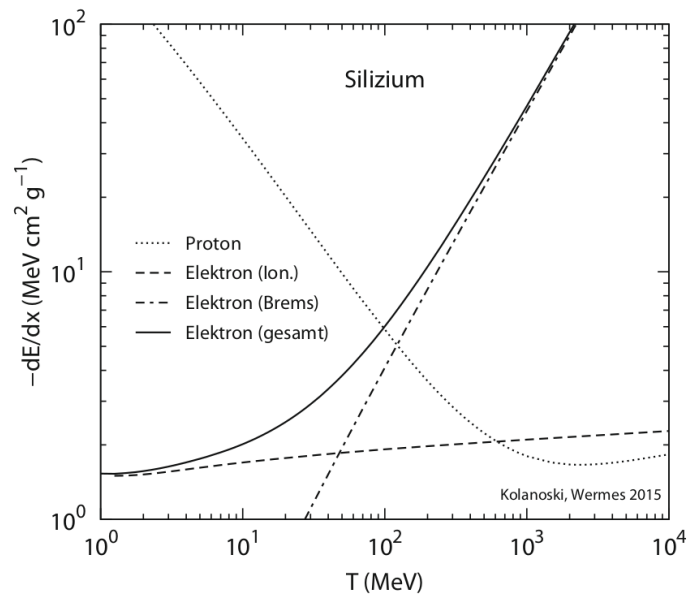


Abbildung 2.1: Der spezifische Energieverlust von Elektronen in Silizium durch Bremsstrahlung und Ionisation in Abhängigkeit von der Energie. Der Energieverlust von Protonen zum Vergleich. [1]

Wechselwirkungen von Photonen in Silizium in Abhängigkeit von der Energie dar. Bei dem Wirkungsquerschnitt handelt es sich um ein Maß für die Wahrscheinlichkeit der Wechselwirkung. Der Wirkungsquerschnitt des photoelektrischen Effekts nimmt bei kleinen Energien ein Maximum an und wird mit steigender Photonenergie kleiner. Der Comptoneffekt dominiert in einem Energiebereich von 100 keV bis zu 10 MeV. Ab 1 MeV nimmt der Wirkungsquerschnitt der Paarerzeugung zu und dominiert etwa ab 10 MeV. Bei kleinen Energien findet auch Rayleigh-Streuung statt, allerdings dominiert bei diesen Energien der photoelektrische Effekt. Die Wahrscheinlichkeit der Paarerzeugung weist eine Energieabhängigkeit auf, hängt allerdings auch von der Masse des Materials ab, wie Abbildung 2.3 zeigt. Mit steigender Energie der Photonen und mit steigender Masse des Materials nimmt die Wahrscheinlichkeit zu. Dieser Zusammenhang wird in Detektoren genutzt, um Photonen in Absorbern konvertieren zu lassen. Absorber bestehen aus sehr massereichem Material mit großer Konversionswahrscheinlichkeit.

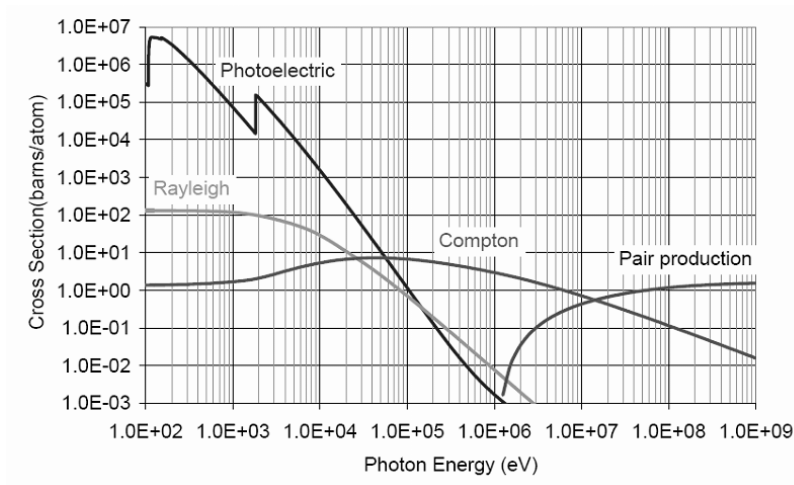


Abbildung 2.2: Der Wirkungsquerschnitt verschiedener Wechselwirkungen von Photonen in Silizium in Abhängigkeit von der Energie der Photonen [2].

2.2 Elektromagnetischer Schauer

Trifft ein hochenergetisches Elektron auf das Material eines Detektors, wird es ein Photon abstrahlen und sich mit verringerter Energie fortbewegen. Das Photon konvertiert in ein Elektron und ein Positron, die weitere Photonen abstrahlen. Es findet abwechselnd Bremsstrahlung und Paarerzeugung statt und es werden immer mehr Teilchen produziert. Diesen Prozess der kaskadenartigen Produktion von Teilchen nennt man einen elektromagnetischen Schauer. Abbildung 2.4 stellt die Ausbreitung eines elektromagnetischen Schauers mit einem Elektron als Ausgangsteilchen, das sich von oben nach unten durch Materie bewegt, grafisch dar. Der Schauer kann auch durch ein Positron oder Photon verursacht werden. Während das Positron einen Schauer auf die gleiche Art und Weise wie das Elektron erzeugt, durch Bremsstrahlung und anschließende Photonkonversion, muss ein Photon zuerst in ein Elektron-Positron-Paar konvertieren, um einen Schauer auszulösen. Die Anzahl der im Schauer produzierten Teilchen nimmt exponentiell mit der zurückgelegten Strecke zu, während die Energie der Teilchen exponentiell abfällt. Sobald eine kritische Energie erreicht wird, findet der

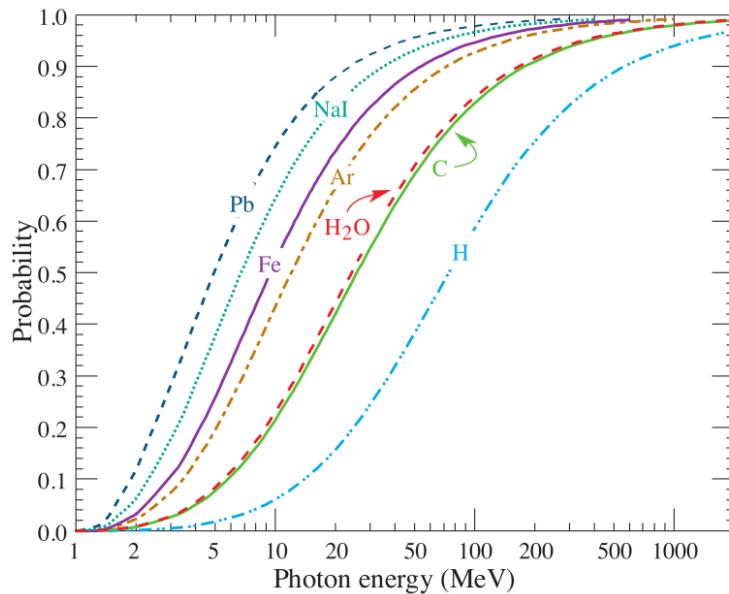


Abbildung 2.3: Die Wahrscheinlichkeit, dass ein Photon in ein Elektron-Positron-Paar konvertiert in Abhängigkeit von der Energie des Photons für verschiedene Materialien [3].

Energieverlust der Elektronen und Positronen nur noch durch Ionisation statt. Außerdem nimmt mit sinkender Energie auch die Konversionswahrscheinlichkeit ab und es werden weniger Elektron-Positron-Paare produziert. Elektromagnetische Schauer haben eine maximale Reichweite, die von der Energie des Ausgangsteilchens abhängt [1].

2.3 Hintergrund von FoCal

Im Jahr 2026 wird in das ALICE-Experiment, das sich am Large Hadron Collider am europäischen Kernforschungszentrum CERN befindet, das FoCal¹ eingebaut werden. Dabei handelt es sich um einen neuen Detektor in Vorwärtsrapidität mit dem Ziel, die Unsicherheiten der Gluondichtefunktion bei kleinen Bjorken-x Werten zu reduzieren. Das Bjorken-x gibt den Impulsbruchteil eines Protons an, den ein Quark oder Gluon des Protons trägt und die Dichtefunktion die Wahrscheinlichkeit dafür. Die Gluondichtefunktion kann durch eine Messung hochenergetischer direkter Photonen untersucht werden. Bei direkten Photonen handelt es sich um Photonen, die

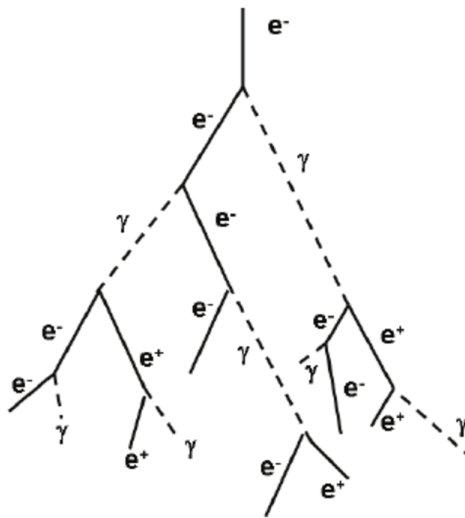


Abbildung 2.4: Ein elektromagnetischer Schauer mit einem Elektron als Ausgangsteilchen. Es findet abwechselnd die Abstrahlung von Photonen und die Erzeugung von Elektron-Positron-Paaren statt [4].

¹Forward Calorimeter

direkt bei der primären Kollision produziert werden und keine Zerfallsprodukte sind. Insbesondere in Vorwärtsrapidität treten viele hochenergetische Teilchen auf. FoCal wird in der Lage sein, die Zerfallsphotonen hochenergetischer neutraler Pionen zu rekonstruieren und somit von direkten Photonen zu unterscheiden. In herkömmlichen Detektoren verschmelzen die Schauer dieser Zerfallsphotonen. Deshalb wird FoCal eine sehr präzise Ortsauflösung aufweisen [5].

Kapitel 3

Experimenteller Aufbau

In diesem Kapitel wird zunächst der Aufbau von FoCal beschrieben. Im Anschluss wird der Hintergrund für die Entwicklung des Detektorprototypen EPICAL-2¹ im Rahmen des ALICE-FoCal Upgrades, sowie dessen Aufbau und Funktionsweise erläutert. Insbesondere wird auf den ALPIDE-Chip eingegangen, dessen Detektorantwort in dieser Arbeit untersucht wird. Zuletzt wird das verwendete Simulationsframework Allpix² beschrieben.

3.1 Aufbau von FoCal

FoCal wird sich 7 m weit entfernt vom Kollisionspunkt bei einer Pseudorapidität von $3.4 < \eta < 5.8$ befinden. Der Detektor besteht aus dem hadronischen FoCal-H und dem elektromagnetischen FoCal-E. In FoCal-E werden neben Wolfram-Absorbern zwei unterschiedliche Silizium-Sensoren für verschiedene Zwecke eingebaut. Achtzehn der Silizium-Sensorlagen werden eine niedrige Granularität mit einer Zellgröße von etwa $1 \times 1 \text{ cm}^2$ aufweisen, zwei eine hohe Granularität mit einer Pixelgröße von etwa $30 \times 30 \mu\text{m}^2$. Abbildung 3.1 zeigt die Anordnung der Sensor- und Absorberlagen sowie die unterschiedliche Granularität der beiden Sensorarten. Vor jeder Sensorlage befindet sich eine Absorberlage. Während die Lagen mit niedriger Granularität zur analogen Energiemessung verwendet werden, sorgen die Lagen mit hoher Granularität für eine präzise Ortsauflösung.

¹Electromagnetic Pixel Calorimeter 2

3.2 Aufbau und Funktionsweise von ALPIDE

Bei dem ALICE Pixel Detector (ALPIDE) handelt es sich um einen digitalen Silizium-Detektorchip, genauer um einen monolithischen aktiven Pixelsensor (MAPS), der für das ALICE-ITS Upgrade entwickelt wurde und in FoCal-E als Sensor mit feiner Granularität eingebaut werden wird. Der ALPIDE-Chip hat eine Größe von $30 \times 15 \text{ mm}^2$ und besteht aus einer $50 \mu\text{m}$ dicken Siliziumschicht, die in eine Epitaxialschicht und eine Substratschicht aufgeteilt ist. An der Oberfläche der Epitaxialschicht befinden sich Auslesedioden. Der Chip besitzt 1024×512 Pixel der Größe $29.24 \times 26.88 \mu\text{m}^2$ mit einer Auslesediode im Zentrum, die einen Durchmesser von $2 \mu\text{m}$ hat [6]. Zwischen den Pixeln befindet sich keine räumliche Abgrenzung. Abbildung 3.2 zeigt ein Foto des ALPIDE-Chips.

Abbildung 3.3 stellt grafisch dar, wie ein Pixel des ALPIDE-Chips ein elektrisch geladenes Teilchen misst. Das Teilchen fliegt durch den Chip, löst in der Epitaxialschicht Elektron-Loch-Paare heraus und verlässt den Chip mit leicht verringerter Energie. Die erzeugten Elektronen können frei durch die Epitaxialschicht im Chip diffundieren, bis sie in das elektrische Feld einer Diode geraten und zu dieser angezogen werden. Sobald

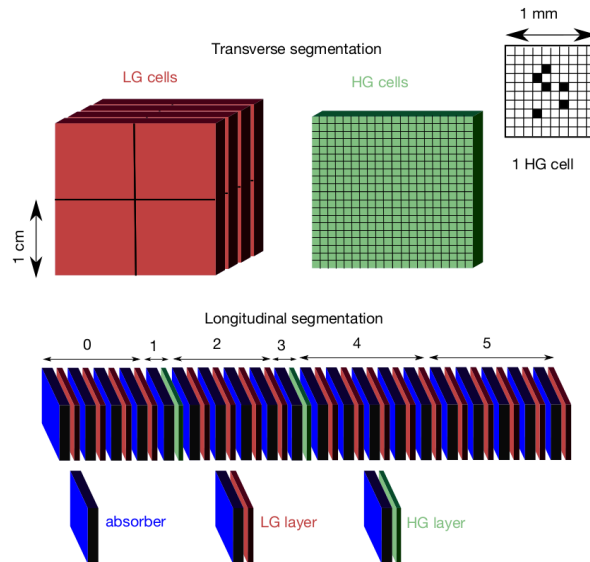


Abbildung 3.1: Schematische Darstellung der transversalen und longitudinalen Segmentierung von FoCal-E [5].

genügend Elektronen bei einer Diode eintreffen, sodass ein Schwellenwert überschritten wird, entsteht ein elektrisches Signal, das angibt, dass ein Pixel getroffen wurde.

3.3 Zweck und Aufbau von EPICAL-2

EPICAL-2 ist ein Prototyp eines rein digitalen elektromagnetischen Kalorimeters, das im Rahmen des FoCal Upgrades entwickelt wurde. Mit EPICAL-2 wird die Pixeltechnologie der ALPIDE-Chips, insbesondere in Bezug auf deren Ortsauflösung,

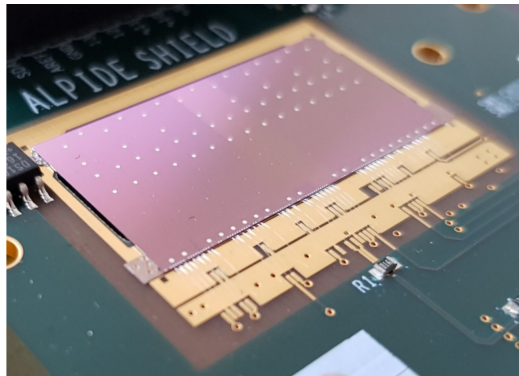


Abbildung 3.2: Ein Foto eines ALPIDE-Chips. [7]

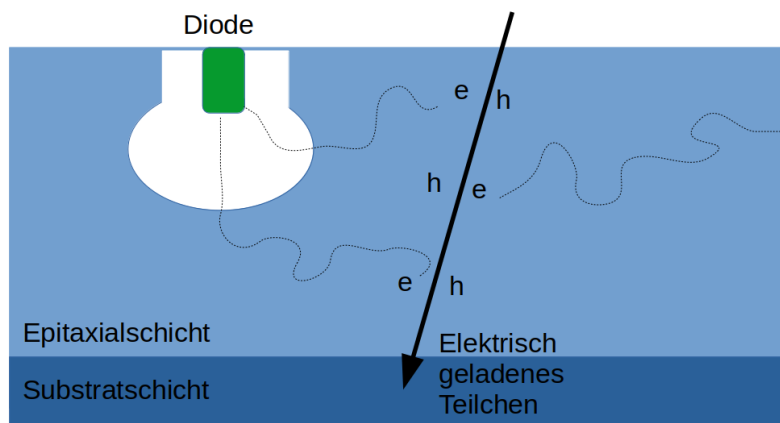


Abbildung 3.3: Ein Pixel im Querschnitt. Der schwarze Pfeil stellt ein elektrisch geladenes Teilchen dar, das durch den Chip fliegt und Elektron-Loch-Paare in der Epitaxialschicht erzeugt.

untersucht. Durch die feine Granularität lässt sich die räumliche Entwicklung eines elektromagnetischen Schauers präzise untersuchen. Außerdem wird die Funktionalität eines rein digitalen Pixelkalorimeters demonstriert. Während analoge Kalorimeter die in jeder Zelle deponierte Energie messen, messen digitale Kalorimeter die Energie eines Schauers durch die gesamte Anzahl der im Detektor getroffenen Pixel. EPICAL-2 besteht aus 24 Lagen, die sich aus jeweils zwei ALPIDE-Chips und einem sich dahinter befindenden 3 mm dicken Wolfram-Absorber zusammensetzt. Die Lagen befinden sich hintereinander in einem Aluminium Gehäuse. Die Chips sind so eingesetzt, dass die Dioden sich an der Vorderseite befinden. Abbildung 3.4 zeigt ein Foto und eine 3D-Grafik von EPICAL-2, in denen die ALPIDE-Chips im Zentrum und die Verkabelung der Ausleseelektronik an den Seiten zu sehen sind. Außerdem sind in der Grafik Kühlelemente dargestellt, die bei Messungen verwendet werden.

Trifft ein Elektron auf EPICAL-2, bildet sich im Detektor ein elektromagnetischer Schauer aus. Die Wolfram-Absorber ermöglichen dabei die Photonkonversion. Die erzeugten Elektronen und Positronen verursachen in den ALPIDE-Chips Pixeltreffer. Die feine Granularität ermöglicht es, dass einzelne Schauerteilchen von EPICAL-2 gemessen werden.

3.4 Datennahme mit EPICAL-2

Da es sich bei EPICAL-2 um einen neuen Detektorprototypen handelt, müssen verschiedene Testmessungen durchgeführt werden. Dies dient einerseits der Kalibrierung,

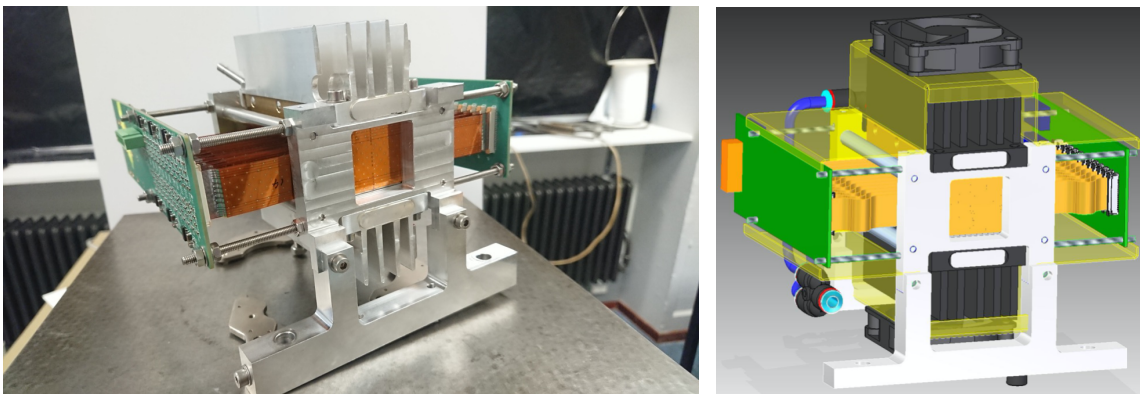


Abbildung 3.4: Links ein Foto von EPICAL-2, rechts eine Grafik [8].

andererseits sollen die allgemeinen Detektoreigenschaften untersucht und die Detektorantwort verstanden werden. Dazu wurden am Forschungszentrum DESY in Hamburg Messungen mit einem Elektron-Teststrahl durchgeführt. Mit dem Strahl wurden Elektronen bekannter Energie auf den Detektor geschossen. Somit lässt sich die Detektorantwort in Abhängigkeit von der Energie untersuchen. Die verwendeten Energien waren 1 GeV, 2 GeV, 3 GeV, 4 GeV, 5 GeV und 5.8 GeV. An der Universität Utrecht wurden kosmische Myonen gemessen. Dazu wurde EPICAL-2 senkrecht ausgerichtet. Myonen sind Teilchen, die keine Schauer verursachen, sondern lediglich durch Ionisation Energie im Detektor deponieren. Da sie sich sehr geradlinig durch die verschiedenen Lagen bewegen, werden sie verwendet, um die exakte Position und Ausrichtung der einzelnen ALPIDE-Chips zu betrachten. Zuletzt wurde eine Messung eines Teststrahls vom SPS-Beschleuniger am CERN durchgeführt. Mit diesem Teststrahl waren Messungen bei deutlich größeren Energien bis zu 80 GeV möglich. Allerdings war dies kein reiner Elektronenstrahl, sondern ein mit Hadronen und Myonen kontaminierter Strahl. Diese Messung wird ebenfalls zur Untersuchung der Energieabhängigkeit der Detektorantwort verwendet.

3.5 Allpix²

Das Framework Allpix² verwendet Monte-Carlo Simulationen, um die Performance von Siliziumdetektoren zu simulieren. Es baut auf GEANT4 zur Simulation der Wechselwirkung von Teilchen mit dem Detektormaterial und ROOT zur Auswertung und Analyse auf. Allpix² ist ein modulares Framework, das leicht den eigenen Bedürfnissen angepasst und erweitert werden kann. Im Folgenden werden die verschiedenen Module und deren Aufgaben beschrieben. Mit Hilfe des Moduls GeometryBuilder kann die gewünschte Detektorgeometrie präzise implementiert und das den Detektor umgebende Medium eingestellt werden. Mit dem ElectricFieldReader kann ein elektrisches Feld hinzugefügt werden. Das Modul DepositionGeant4 wird verwendet, um einen Teilchenstrahl, der auf den Detektor trifft, sowie dessen Erzeugung von Ladungsträgern durch die Wechselwirkung mit Materie zu simulieren. GenericPropagation simuliert die Diffusion der Ladungsträger im Detektormaterial und das Modul SimpleTransfer ordnet diese einem Pixelsensor zu. Zuletzt wandelt der DefaultDigitizer die Ladungen in ein digitales Signal um, welches der DetectorHistogrammer auswertbaren ROOT-Dateien

abspeichert. Alternativ zum `DetectorHistogrammer` kann auch der `CaloOutputWriter` verwendet werden [9].

Kapitel 4

Analyse

In dieser Arbeit wird die Detektorantwort eines einzelnen ALPIDE-Chips auf einzelne Schauerteilchen mit Hilfe von Simulationen untersucht. Zunächst werden die Simulationsparameter vorgestellt und die Detektorantwort definiert. Im Anschluss wird die Untersuchung der Detektorantwort des ALPIDE-Chips erläutert und gezeigt, von welchen Variablen diese abhängt. Die Ergebnisse der Simulation werden mit Messdaten des EPICAL-2 Prototypen verglichen und zuletzt werden Cluster durch eine Ellipse parametrisiert.

4.1 Parameter der Simulation

Für diese Arbeit wird ein einzelner ALPIDE-Chip und eine Teilchenquelle, die ein einzelnes Teilchen auf den Chip schießt, simuliert. Dazu werden Dateien verwendet, die die Geometrie des ALPIDE-Chips sowie das elektrische Feld der Pixel exakt beschreiben [10]. Vakuum wird als umgebendes Medium gewählt, da Wechselwirkungen des Teilchens mit Luftmolekülen ausgeschlossen werden sollen. Messungen mit EPICAL-2 wurden in Luft durchgeführt, allerdings liegt der Fokus dieser Arbeit alleine auf der Wechselwirkung der Teilchen mit dem ALPIDE-Chip. Die Temperatur wird auf 293 K festgelegt. Der ALPIDE-Chip wird in Allpix² so implementiert, dass dessen Zentrum sich im Ursprung des Koordinatensystems befindet und die lange Seite des Chips parallel zur x-Achse und die kurze Seite parallel zur y-Achse ausgerichtet ist, wie Abbildung 4.1 darstellt.

Die Vorderseite des Chips zeigt in positive z -Richtung. Die Teilchenquelle befindet sich zentral vor dem Chip in einer Entfernung von 10 cm und erzeugt einen Teilchenstrahl in negative z -Richtung, sodass Teilchen zentral und gerade auf den Chip treffen. Dieser Strahl besteht aus nur einem Teilchen mit festgelegter Energie und hat keine Breite, wodurch die Position, an der das Teilchen auf den Chip trifft, präzise festgelegt wird. Die verwendeten Teilchen sind Elektronen, Positronen und Photonen, da diese in einem elektromagnetischen Schauer entstehen. Außerdem werden Myonen verwendet, um die Ergebnisse der Simulation mit Messungen kosmischer Myonen, die an der Universität Utrecht durchgeführt wurden, zu vergleichen. Jeder Pixel erhält ein elektrisches Feld durch das Anlegen einer Rückwertsvorspannung von 1.4 V an der Diode. Nach Festlegung der Detektorgeometrie und Art des Teilchenstrahls werden einige Parameter für die Simulation der Diffusion von Elektron-Loch-Paaren, die von dem Teilchen im Chip deponiert werden, eingestellt. Die folgenden Parameter werden von Simulationen von EPICAL-2 übernommen [10]. Die Ladungsträger werden in Gruppen von 50 Teilchen eingeteilt und werden gemeinsam innerhalb einer Integrationszeit von 25 ns propagiert. Das Gruppieren reduziert die benötigte Rechenzeit für eine Simulation ohne das Resultat zu beeinflussen. Befinden sich die Ladungsträger maximal $5\ \mu\text{m}$ von der Diodenoberfläche entfernt werden sie akzeptiert und von der Diode registriert. Sobald ein Schwellenwert von 82 ± 20 Elektronen an einer Diode überschritten

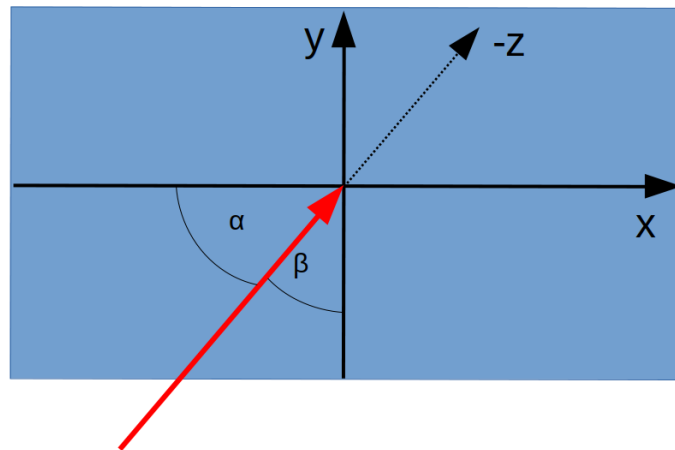


Abbildung 4.1: Darstellung der Geometrie des Detektor-Setups. Die lange Seite des Chips liegt in x -Richtung. Der rote Pfeil stellt ein Teilchen dar, das auf den Chip geschossen wird. α und β beschreiben die Winkel des Teilchenstrahls zur x -Achse und y -Achse.

wird, liegt ein Pixeltreffer vor. Außerdem wird ein gaußverteiltes Rauschen der Elektronik des Chips mit einer Standardabweichung von 20 Elektronen hinzugefügt. In dieser Arbeit wird die Detektorantwort des ALPIDE-Chips in Abhängigkeit von der Energie, der Position des Aufttrittspunktes und dem Einschusswinkel untersucht. Pro Variation dieser Parameter wird eine Simulation mit 10^4 Events ausgeführt, um statistische Unsicherheiten klein zu halten.

4.2 Definition der Detektorantwort

Bei der Detektorantwort des ALPIDE-Chips handelt es sich um die Anzahl der Pixeltreffer N_{Hits} in einem Event und deren geometrische Anordnung. Eine Gruppierung von Pixeltreffern in einem Event heißt Cluster und die geometrische Anordnung Clusterform. N_{Hits} kann auch als Clustergröße verstanden werden, vorausgesetzt es entsteht nur ein einzelner Cluster pro Event.

4.3 Energieabhängigkeit der Detektorantwort

Ob und wie die Detektorantwort von der Energie der Teilchen abhängt, wird zunächst durch Häufigkeitsverteilungen von N_{Hits} untersucht. Da die kleinste für EPICAL-2 verwendete Teststrahl-Energie 1 GeV ist und die Energie von Schauerteilchen exponentiell abnimmt, wird diese Energie als Obergrenze gesetzt. Als untere Grenze wird 1 keV gewählt, um zu untersuchen, ab welcher Energie Teilchen mit dem ALPIDE-Chip gemessen werden können. Diese Energie befindet sich allerdings weit unterhalb der kritischen Energie eines elektromagnetischen Schauers. Die kritische Energie von Elektronen in Wolfram beträgt $E_{\text{krit}} = 7.97 \text{ MeV}$ [3]. In Abbildung 4.2 sind N_{Hits} -Verteilungen für Elektronen, die gerade und zentral auf den Chip treffen, mit ausgewählten Energien gezeigt. Das Maximum der Verteilungen befindet sich bei vier Pixeltreffern. Nur bei der Verteilung von 70 keV befindet es sich bei sechs Pixeltreffern. Die Anzahl der Events ohne Pixeltreffer nimmt mit steigender Energie ab. Alle Verteilungen fallen mit steigenden Werten von N_{Hits} ab, allerdings wird dort auch der größte Unterschied zwischen den Verteilungen beobachtet. Während bei 50 keV und 70 keV keine Events mit zehn oder mehr Pixeltreffer stattfinden und bei 1 GeV nur in

einzelnen Events bis zu vierzehn Pixel ausgelöst werden, sind hohe Werte bei 140 keV und 300 keV häufiger. Bei 140 keV fällt die Verteilung weniger schnell ab und in einzelnen Events gibt es bis zu sechzehn Pixeltreffer. Bei 300 keV fällt die Verteilung zunächst ab, erreicht jedoch deutlich höhere Werte.

Für jede N_{Hits} -Verteilung wird der Mittelwert $\langle N_{\text{Hits}} \rangle$ berechnet und gegen die Energie aufgetragen, da sich so die N_{Hits} -Verteilungen anhand eines einzelnen Wertes für viele Energien vergleichen lassen. Es werden Energien im Bereich von 1 keV bis 1 GeV betrachtet. In Abbildung 4.3 sind die $\langle N_{\text{Hits}} \rangle$ -Verteilungen von Elektronen, Positronen und Photonen dargestellt. Es fällt auf, dass die Verteilungen von Elektronen und Positronen gleich sind und die von Photonen gänzlich anders verläuft. $\langle N_{\text{Hits}} \rangle$ von Elektronen und Positron ist bis zu Energien von 20 keV null und steigt von da an mit zunehmender Energie an. Etwa bei 140 keV wird ein Maximum erreicht. Steigt die Energie weiter an, nehmen die Werte wieder ab, bis sie bei 1 MeV einen ungefähr konstanten Wert erreichen. Eine leichte Energieabhängigkeit wird auch bei Energien

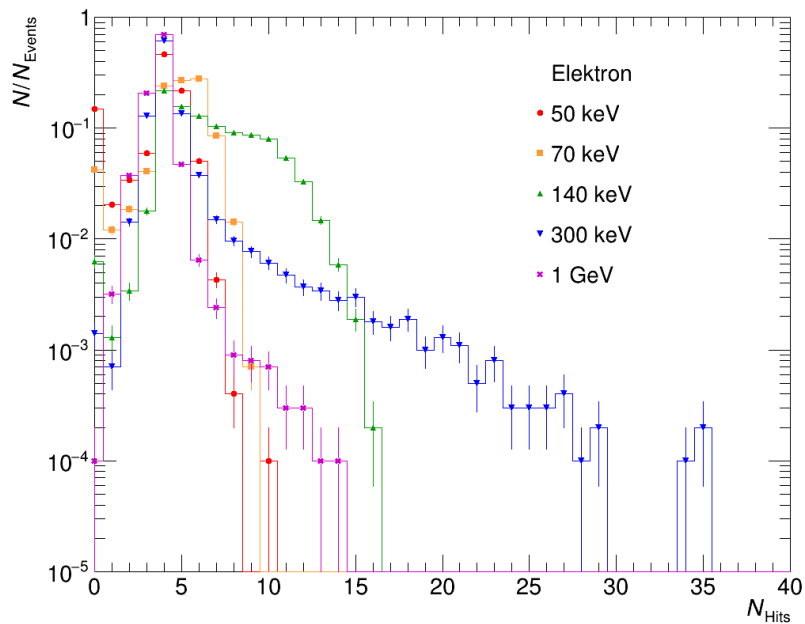


Abbildung 4.2: Die Häufigkeit der Anzahl der Pixel Treffer pro Event mit verschiedenen Energien.

über 1 MeV beobachtet. Das wird in dieser Arbeit jedoch vernachlässigt, da diese Energieabhängigkeit im Vergleich zu der bei Energien unterhalb von 1 MeV gering ist. Die $\langle N_{\text{Hits}} \rangle$ -Verteilung von Photonen weist ein kleines Maximum bei etwa 6 keV auf. Bei Energien unterhalb von 3 keV und oberhalb von 10 keV werden im Mittel keine Pixel durch Photonen ausgelöst.

Um die Verteilung der Elektronen und Positronen zu erklären, wird ein anderes Simulationssetup verwendet: 5 cm hinter dem ALPIDE-Chip befindet sich ein zweiter ALPIDE-Chip. Abbildung 4.4 zeigt, in wie vielen der Events Elektronen im zweiten Chip Pixeltreffer verursachen. Unterhalb von 90 keV werden im zweiten Chip keine Pixel ausgelöst. Ab dieser Energie steigt die Anzahl an und ab 1 MeV werden in jedem Event Pixel im zweiten Chip getroffen. Bei niedrigen Energien deponieren die Elektronen ihre gesamte Energie im ersten Chip und mit steigender Energie steigt auch die Anzahl der Pixeltreffer an. Mit zunehmender Energie steigt jedoch auch die Wahrscheinlichkeit, dass die Elektronen den ersten Chip durchqueren und den

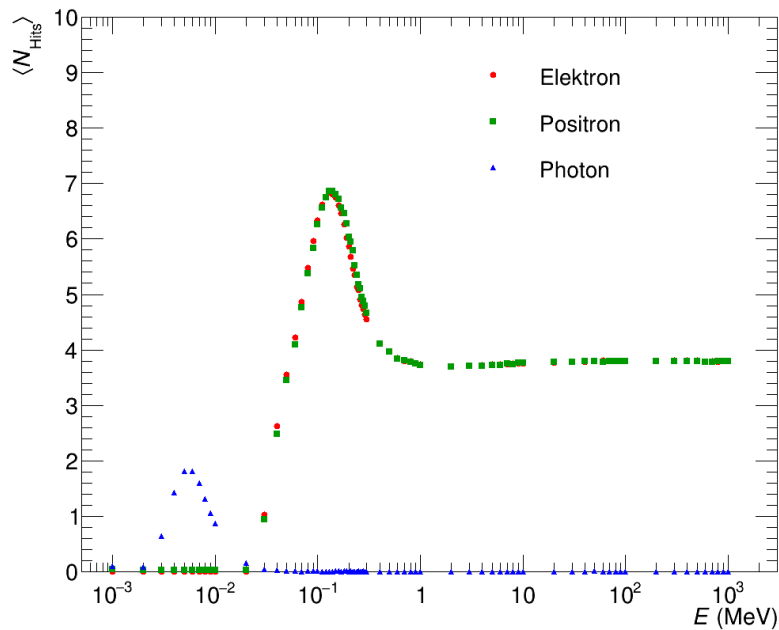


Abbildung 4.3: Die Mittelwerte der N_{Hits} -Verteilungen in Abhängigkeit von der Energie für Elektronen, Positronen und Photonen.

zweiten erreichen. Das liegt an der Energieabhängigkeit des Energieverlusts von Elektronen. In dem Fall, dass die Teilchen den zweiten Chip erreichen, wird nur noch ein Bruchteil der Energie im ersten Chip deponiert. Bei 140 keV, dem Maximum der $\langle N_{\text{Hits}} \rangle$ -Verteilung, deponieren etwa 60% der Elektronen noch ihre gesamte Energie im ersten Chip, dagegen sind es bei 300 keV nur etwa 12%. Dies erklärt die Form der N_{Hits} -Verteilungen: Bei 140 keV wird häufig die gesamte Energie deponiert und es entstehen mehr Pixeltreffer. Bei 300 keV wird selten die gesamte Energie deponiert, aber in diesen seltenen Fällen treten sehr viele Pixeltreffer auf. Meistens wird nur ein Bruchteil der Energie deponiert und es gibt wenige Pixeltreffer, weshalb auch der Mittelwert niedrigere Werte als bei 140 keV annimmt. $\langle N_{\text{Hits}} \rangle$ erreicht ab 1 MeV einen ungefähr konstanten Wert, da alle Teilchen nur einen festen Bruchteil ihrer Energie deponieren.

Das Maximum der $\langle N_{\text{Hits}} \rangle$ -Verteilung von Photonen wird vom photoelektrische Effekt verursacht, der unterhalb von 50 keV der dominierende Effekt ist. Der ALPIDE-Chip kann also nur sehr wenige Photonen messen. EPICAL-2 misst keine Photonen, sondern die Elektronen und Positronen die in den Wolfram-Absorbern durch Paarerzeugung

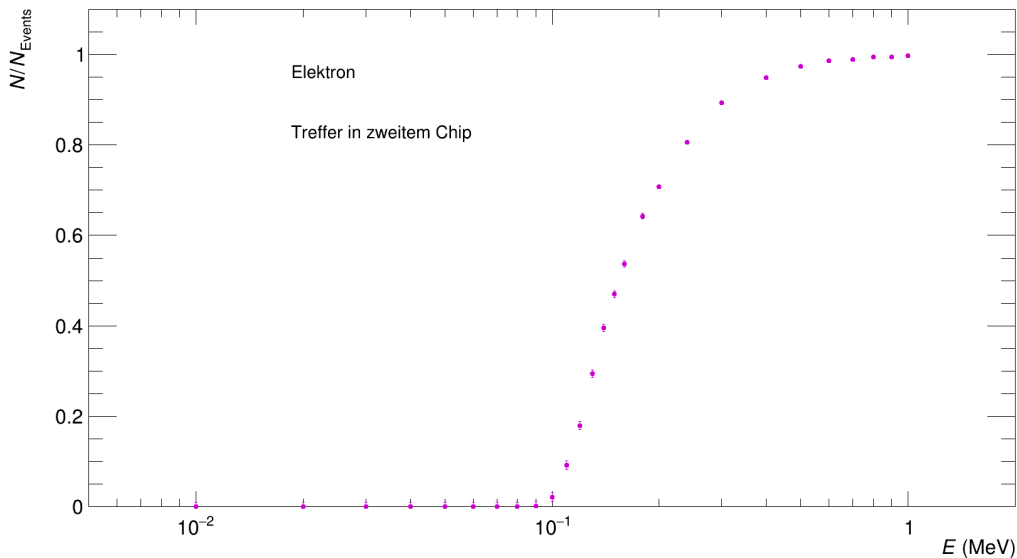


Abbildung 4.4: Die Häufigkeit von Elektron-Events, in denen mindestens ein Pixel im zweiten Chip getroffen wird.

produziert werden. Die $\langle N_{\text{Hits}} \rangle$ -Verteilungen zeigen, dass der ALPIDE-Chip einzelne Elektronen und Positronen ab einer Energie von etwa 30 keV messen kann. Bei Energien unterhalb von 140 keV werden jedoch einige der Teilchen nicht detektiert. Der relevanteste Energiebereich für Messungen elektromagnetischer Schauer ist der oberhalb von 1 MeV, bei dem die Verteilungen ungefähr konstant verlaufen.

4.4 Positionsabhängigkeit der Detektorantwort

In einer realen Messung treffen Teilchen an einer zufälligen Position auf den Chip. Im Folgenden wird untersucht, ob die Position, an der Elektronen auf den Chip treffen, einen Einfluss auf die Detektorantwort hat. Dazu werden vier verschiedene Fälle betrachtet. Der zuvor untersuchte Fall, in dem Elektronen zentral auf den Chip treffen, wird als Standard gewählt. Die Position wird einmal in x-Richtung um $14.62 \mu\text{m}$ verschoben und einmal in y-Richtung um $13.44 \mu\text{m}$. In beiden Fällen trifft das Elektron exakt zwischen zwei Dioden auf den Chip auf. Zuletzt wird die Position sowohl in x- als auch in y-Richtung verschoben, sodass die Elektronen direkt auf eine Diode treffen. Abbildung 4.5 veranschaulicht diese Variationen, die im Folgenden x-Offset, y-Offset und xy-Offset genannt werden.

Zum Vergleich der Positionsvariationen werden $\langle N_{\text{Hits}} \rangle$ -Verteilungen von Elektronen verwendet. Abbildung 4.6 stellt die Verteilungen der vier betrachteten Fälle und das Verhältnis der Variationen zum Standard dar. Die Verteilungen der Variationen weisen insgesamt die gleiche Form wie der zentrale Fall auf, nehmen aber kleinere Werte

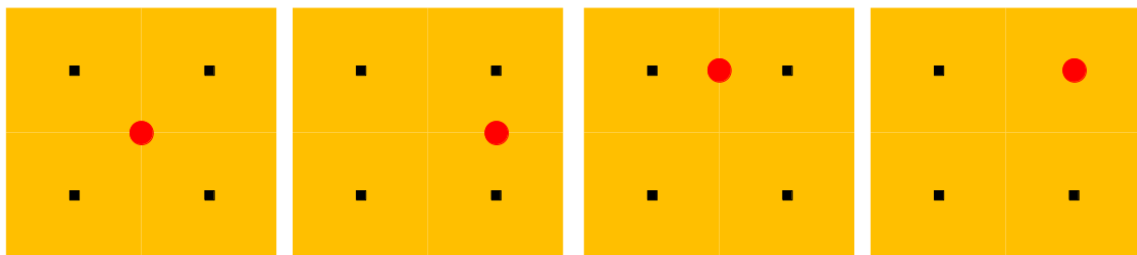


Abbildung 4.5: Die Variationen des Auftrittspunktes der Teilchen. Jedes Rechteck repräsentiert vier Pixel und die schwarzen Quadrate entsprechen den Dioden. Die Teilchen treffen im Zentrum des roten Kreises auf.

an. Die Verteilung des xy-Offsets weist die niedrigsten Werte auf. $\langle N_{\text{Hits}} \rangle$ nimmt beim y-Offset bei jeder Energie größere Werte als beim x-Offset an. Die Ursache für die Abweichung der Variationen ist geometrisch: Treffen die Elektronen zentral auf den Chip, befinden sich vier Dioden in gleichem Abstand um den Teilchenstrahl herum und werden mit hoher Wahrscheinlichkeit getroffen. Beim x-Offset und y-Offset befinden sich nur zwei Dioden in unmittelbarer Nähe zum Teilchenstrahl. Befindet sich eine Diode im Teilchenstrahl, wird diese ausgelöst. Die nächsten umliegenden Dioden befinden sich allerdings weiter entfernt. Der Unterschied zwischen x-Offset und y-Offset wird von der Pixelgeometrie verursacht. Die Abstände zu den drittnächsten Dioden sind nicht gleich, da die Pixel nicht quadratisch sind. Differenzen von wenigen Mikrometern haben einen Einfluss auf die Wahrscheinlichkeit, dass ein Pixel getroffen wird.

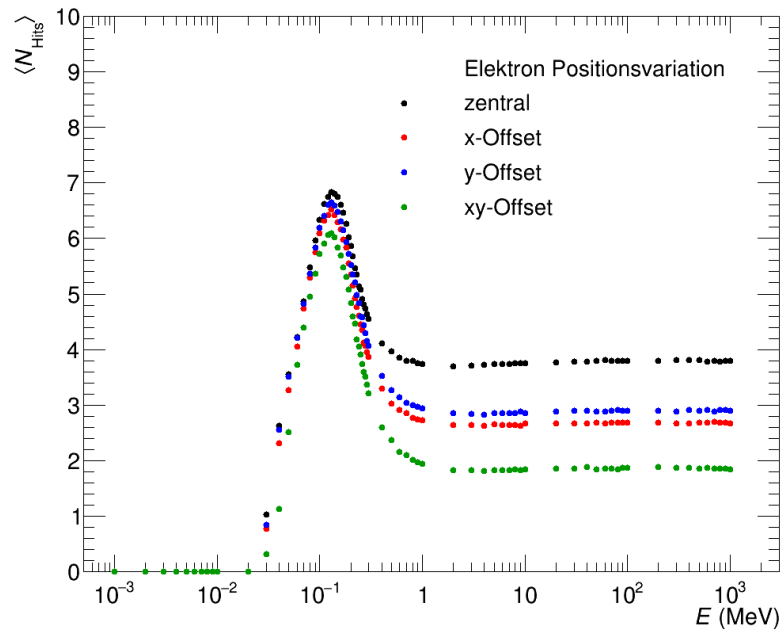


Abbildung 4.6: Die Energieabhängigkeit der mittleren Anzahl der Pixeltreffer für verschiedene Punkte, an denen ein Elektron auf den Chip trifft.

4.5 Winkelabhängigkeit der Detektorantwort

Ein elektromagnetischer Schauer breitet sich grundsätzlich in die Richtung aus, in die sich das Ausgangsteilchen bewegt hat. Die produzierten Teilchen bewegen sich auf Grund der Wechselwirkungen mit dem Detektormaterial mit einem zufälligen Winkel, weshalb die Winkelabhängigkeit der Detektorantwort des ALPIDE-Chips untersucht wird. Dazu wird der Winkel des Teilchenstrahls zur x-Achse variiert, während der Winkel zur y-Achse fest auf 90° eingestellt wird. Der Winkel θ beschreibt den Winkel des Teilchenstrahls zur z-Achse. Treffen die Teilchen im 90° -Winkel zur x-Achse auf den Chip, gilt $\theta = 0$. $\langle N_{\text{Hits}} \rangle$ -Verteilungen von Elektronen werden verwendet, um den Effekt der Winkelvariationen zu untersuchen. Abbildung 4.7 zeigt die Verteilungen für vier verschiedene Winkel: $\theta = 0^\circ$, $\theta = 40^\circ$, $\theta = 60^\circ$, $\theta = 80^\circ$.

Das Maximum der Verteilungen und der konstante Bereich befinden sich bei größeren Energien und bei größeren Werten, wenn der Winkel zunimmt. Die Fälle $\theta = 0^\circ$ und $\theta = 40^\circ$ unterscheiden sich kaum, während bei $\theta = 60^\circ$ ein deutlicher Unterschied

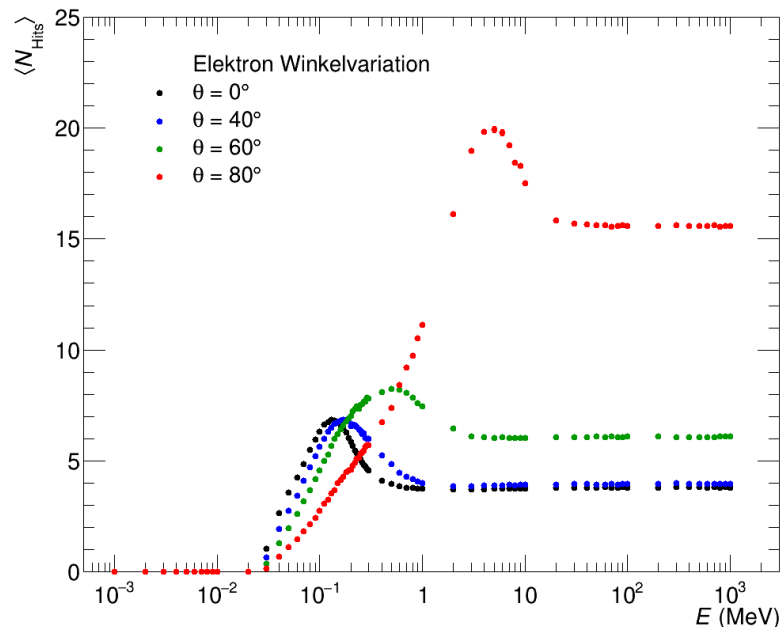


Abbildung 4.7: Winkelabhängigkeit der $\langle N_{\text{Hits}} \rangle$ -Verteilungen von Elektronen. θ beschreibt den Winkel zur z-Achse in x-Richtung.

beobachtet wird. Jedoch ist der Unterschied bei $\theta = 80^\circ$ am größten. Durch den Winkel nimmt die effektive Chiptiefe zu. Treffen die Elektronen mit $\theta = 80^\circ$ auf den Chip, müssen sie etwa sechsmal so viel Material durchqueren wie bei $\theta = 0^\circ$. Mit dem Winkel nimmt also die Wegstrecke im ALPIDE-Chip zu und dadurch auch der totale Energieverlust, weshalb auch Elektronen mit größerer Energie ihre gesamte Energie im Chip deponieren und mehr Elektron-Loch-Paare erzeugen. Zusätzlich befinden sich mehr Pixel in der Umgebung des Teilchenstrahls, die ausgelöst werden können. Die Strecke, die Elektronen bei $\theta = 80^\circ$ in der Epitaxialschicht zurücklegen, wenn sie den Chip geradlinig und vollständig durchqueren, entspricht einer Breite von fünf Pixeln. In einem elektromagnetischen Schauer ist zu erwarten, dass hochenergetische Teilchen mit großen Winkeln allerdings sehr selten auftreten.

4.6 Die Häufigkeit von Clusterformen

Die Anzahl der Pixeltreffer beschreibt, wie zu Beginn des Kapitels erläutert, nur einen Teil der Detektorantwort. Die geometrische Anordnung der Pixeltreffer wird im Folgenden mit Hilfe von Häufigkeitsverteilungen von Clusterformen untersucht. Abbildung 4.8 zeigt die verwendete Kategorisierung von Clusterformen in Klassen.

Jede Klasse erhält eine Identifikationsnummer, deren erste Ziffer für die Anzahl der Pixel des Clusters steht. Die nachfolgenden Ziffern stellen eine Nummerierung dar. Pro Elektron-Event treten am häufigsten vier Pixeltreffer auf, wie Abbildung 4.2 zeigt. Deshalb werden insbesondere Clusterformen mit vier Pixeltreffern untersucht. Während Rotationen und Spiegelungen von Clusterformen bei drei Pixeltreffern jeweils eine eigene Klasse erhalten, werden gespiegelte Formen mit vier Pixeln zusammengefasst. Die Annahme ist, dass gespiegelte Varianten der gleichen Form die gleiche Häufigkeit aufweisen, da sie gleich groß sind. Um 90° rotierte Formen werden auf Grund der Pixelgeometrie mit unterschiedlicher Häufigkeit erwartet. Die Pixel des ALPIDE-Chips sind in x-Richtung $2.36\mu\text{m}$ länger als in y-Richtung, weshalb beispielsweise die Cluster der Formen 42 und 43 unterschiedlich dimensioniert sind. Für Cluster bestehend aus drei und vier Pixeltreffern wird jeweils eine zusätzliche Klasse verwendet, die alle nicht berücksichtigten Formen beinhaltet. Außerdem wird für Events mit zwei bis vier Pixeltreffern eine Klasse räumlich getrennter Pixeltreffer verwendet, um zu untersuchen, ob in einem Event mehrere Cluster entstehen können. Da

$\langle N_{\text{Hits}} \rangle$ -Verteilungen ein Maximum mit großen Werten aufweisen und insbesondere bei großen Winkeln zur z -Achse viele Pixel getroffen werden, wird jeweils eine Klasse für Cluster mit fünf bis zehn Pixeltreffern definiert und eine Klasse für Cluster mit mehr als zehn Pixeltreffern. Der Fokus dieser Analyse liegt allerdings auf der Untersuchung der Häufigkeit der kleineren Cluster. Abbildung 4.8 stellt die Häufigkeitsverteilung von Clusterformen, die auftreten, wenn Elektronen verschiedener Energien gerade und zentral auf den Chip treffen, dar.

Dazu werden die zuvor definierten Klassen verwendet. Die verwendeten Energien entsprechen unterschiedlichen Bereichen der $\langle N_{\text{Hits}} \rangle$ -Verteilung: ein Anstieg von $\langle N_{\text{Hits}} \rangle$ bei 50 keV, das Maximum bei 140 keV und der annähernd konstante Verlauf bei 100 MeV. Bei allen betrachteten Energien tritt am häufigsten die Clusterform 41 auf, während längliche Formen wie 44 und 45 nicht beobachtet werden. Im Bereich des Maximums der $\langle N_{\text{Hits}} \rangle$ -Verteilung treten am häufigsten Cluster mit fünf Pixeltreffern auf und Cluster mit mehr als zehn Pixeltreffern sind ebenfalls sehr häufig. Daher treten bei dieser Energie kleinere Cluster, also Cluster bestehend aus wenigen Pixeltreffern, selten auf. Die Formen 31 bis 34 haben für eine Energie im Rahmen der Unsicherheiten die gleiche Häufigkeit, was die Annahme bestätigt, dass die geometrische Ausrichtung der Cluster die Häufigkeit nicht beeinflusst, wenn die Dimensionen gleich bleiben. Die




















ID	Form	ID	Form	ID	Form	ID	Form	ID	Form
1		31		36		43		48	
21		32		37	Mehrere Cluster	44		49	
22		33		38	Andere Formen	45		410	Mehrere Cluster
23		34		41		46		411	Andere Formen
24	Mehrere Cluster	35		42		47		5, 6, 7, 8, 9, 10, 11	5-10 Pixel, größere Cluster

Abbildung 4.8: Die Kategorisierungstabelle von Clusterformen in Klassen, die durch IDs gekennzeichnet werden. Jedes Quadrat entspricht einem Pixeltreffer. Die erste Ziffer jeder ID entspricht der Anzahl an Pixeln, die folgenden Ziffern sind eine Nummerierung.

Formen 42 und 43 oder 48 und 49 treten mit unterschiedlicher Häufigkeit auf, da die um 90° rotierte Version von diesen Clusterformen unterschiedliche Dimensionen haben, weshalb die Wahrscheinlichkeit, dass die Pixel getroffen werden, unterschiedlich groß ist. Zum Beispiel die Länge der Form 43 in x-Richtung ist größer als die Länge der Form 42 in y-Richtung. Daher tritt die Form 43 seltener auf. Mehrere Cluster in einem Event treten in weniger als 0.1% der Events auf. Eine mögliche Ursache ist simuliertes Rauschen der Elektronik des Chips oder ein Szenario, in dem die Ladungsträger in der Epitaxialschicht so diffundieren, dass zwei räumlich voneinander getrennte Pixel getroffen werden, aber die Pixel dazwischen nicht. Diese Events sind auf Grund ihrer Seltenheit vernachlässigbar. Die Klassen 38 und 411 treten in weniger als 0.3% aller Events auf und zeigen, dass die Kategorisierung für Cluster bestehend aus drei bis vier Pixeln die relevantesten Formen berücksichtigt. Die meisten auftretenden Cluster sind kompakte Formen, da die Wahrscheinlichkeit, dass ein Pixel getroffen wird, der sich in der Nähe des Aufttrittspunktes des Teilchens befindet, groß ist. Lange, aber schmale Formen treten sehr selten oder überhaupt nicht auf. Im Folgenden werden

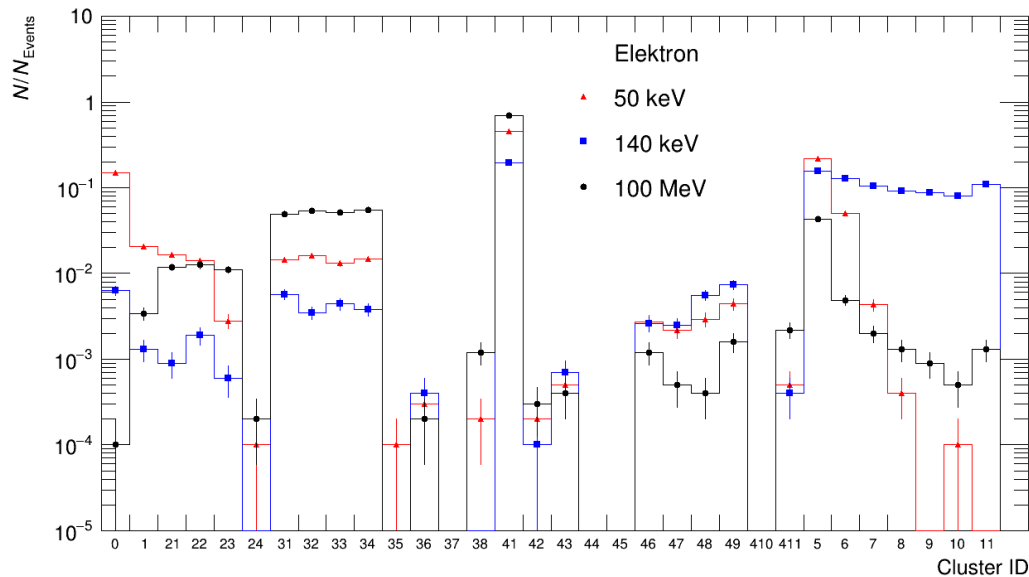


Abbildung 4.9: Die Häufigkeitsverteilung der Clusterformen in Elektron-Events. Die gewählten Energien sind 50 keV, 140 keV, 100 MeV und entsprechen drei verschiedenen Bereichen der $\langle N_{\text{Hits}} \rangle$ -Verteilung.

der Auftrittspunkt der Elektronen und der Winkel zur z -Achse variiert und deren Effekt auf die Häufigkeit der Clusterformen untersucht. Die Energie der Elektronen wird auf 100 MeV festgelegt, da die $\langle N_{\text{Hits}} \rangle$ -Verteilungen für alle Winkel bei dieser Energie annähernd konstant verlaufen.

In Abbildung 4.10 wird die Häufigkeitsverteilung der Clusterformen mit Variation des Auftrittspunktes der Elektronen dargestellt. Deutliche Unterschiede der Häufigkeit von Clusterformen sind erkennbar. Im zentralen Fall tritt, wie zuvor diskutiert, die Form 41 am häufigsten auf. Da das Elektron exakt zwischen vier Dioden auf den Chip trifft, werden die vier umliegenden Pixel mit großer Wahrscheinlichkeit ausgelöst. Trifft das Elektron im x -Offset oder y -Offset exakt zwischen zwei Dioden auf, sind insbesondere Cluster bestehend aus zwei benachbarten Pixeln sehr häufig. Beim xy -Offset trifft das Elektron direkt auf eine Diode, weshalb ein einzelner Pixeltreffer sehr häufig auftritt. Die Position des Auftrittspunktes hat demnach einen großen Effekt auf die Häufigkeitsverteilung der Clusterformen.

Abbildung 4.11 zeigt die Häufigkeitsverteilungen der Clusterform für Elektronen, die

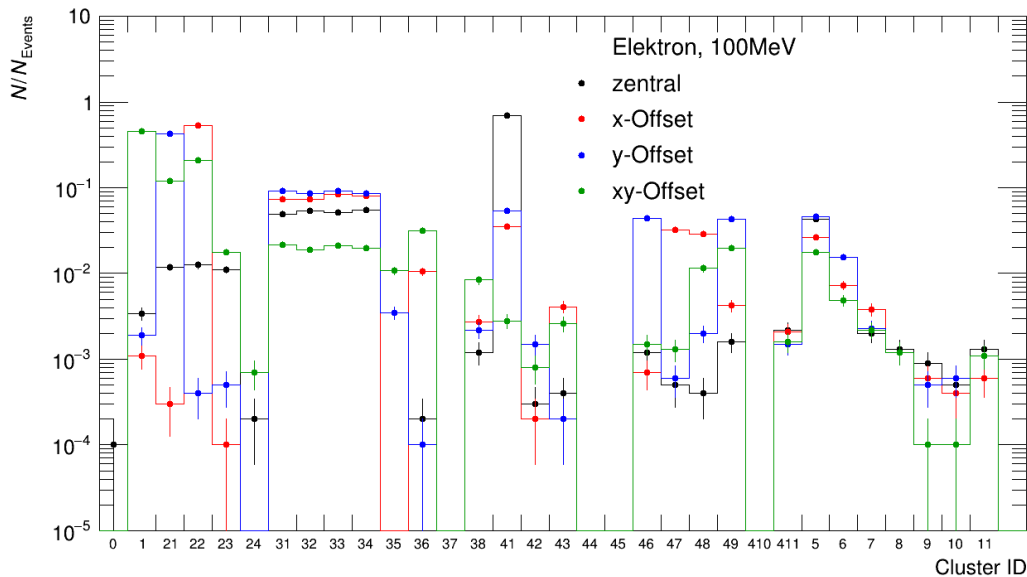


Abbildung 4.10: Die Häufigkeitsverteilung von Clusterformen von Elektronen. Die gewählten Energien sind 50 keV, 140 keV, 100 MeV und entsprechen drei verschiedenen Bereichen der $\langle N_{\text{Hits}} \rangle$ -Verteilung.

mit verschiedenen Winkeln θ auf den Chip treffen. Der Winkel θ entspricht dem in Abschnitt 4.5 definierten Winkel. Im Vergleich zu dem Fall $\theta = 0$ treten mit zunehmendem Winkel größere Clusterformen auf. Cluster mit mehr als fünf Pixeltreffern treten bei $\theta = 40^\circ$ und $\theta = 60^\circ$ am häufigsten auf. Bei $\theta = 80^\circ$ sind Cluster mit mehr als zehn Pixeltreffern am wahrscheinlichsten. Es gilt die gleiche Erklärung wie in Abschnitt 4.5: Bei großen Winkeln durchqueren die Elektronen mehr Detektormaterial und viele Pixel werden getroffen. Die Cluster werden größer und länger. Diese Kategorisierung lässt sich demnach bei großen Winkeln nicht gut anwenden.

Es hat sich gezeigt, dass die Häufigkeit der Clusterformen sowohl von der Energie der Elektronen, der Position, an der sie auf den Chip treffen und von dem Winkel abhängt. Aus geometrischen Gründen tritt die Form 41 im zentralen Fall sehr häufig auf. Bei großen Winkeln entstehen zu große Cluster, um sie mit dieser Kategorisierung untersuchen zu können.

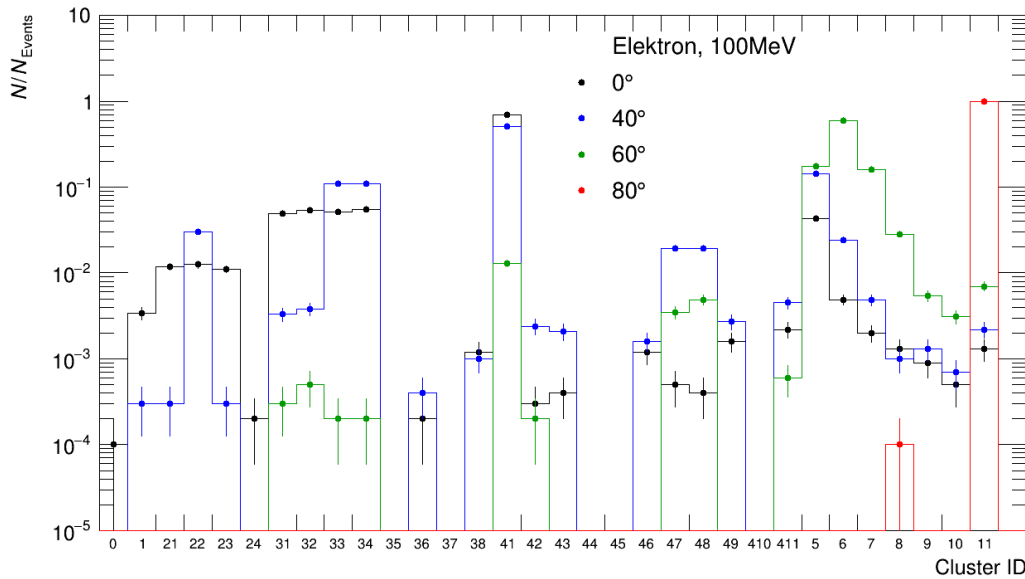


Abbildung 4.11: Die Häufigkeitsverteilung von Clusterformen von Elektronen. Die gewählten Energien sind 50 keV, 140 keV, 100 MeV und entsprechen drei verschiedenen Bereichen der $\langle N_{\text{Hits}} \rangle$ -Verteilung.

4.7 Vergleich zu Daten von EPICAL-2

Neben dieser Analyse der Detektorantwort des ALPIDE-Chips mit Hilfe von Clusterformen wird auch eine Analyse der Clusterformen, die in EPICAL-2 auftreten, durchgeführt. Dazu werden Daten einer Messung kosmischer Myonen verwendet, die an der Universität Utrecht durchgeführt wurde. Für einen Vergleich werden im Folgenden Myonen simuliert. Es wird die für die Analyse der Daten genutzte Kategorisierung verwendet, um die Häufigkeit der Clusterformen zu untersuchen [11]. Abbildung 4.12 zeigt die Kategorisierung der Clusterformen, die im Folgenden verwendet wird. Die Identifikationsnummern der Clusterformen setzen sich erneut aus der Anzahl der Pixeltreffer und einer Nummerierung zusammen. Rotierte und gespiegelte Varianten werden hier nicht zusammengefasst, um zu untersuchen, ob diese sowohl in Daten als auch in Simulationen gleich häufig auftreten.

Zunächst wird die Energieabhängigkeit der Clusterformen simulierter Myonen betrachtet, die zentral und gerade auf den Chip treffen. Abbildung 4.13 zeigt die Häufigkeitsverteilungen von Clusterformen für verschiedene Energien. Die Verteilungen haben für alle Energien den gleichen Verlauf. Die Form 43 tritt mit Abstand am häufigsten auf. Gespiegelte Varianten von Clusterformen treten wie zuvor bei simulierten
























ID	Form	ID	Form	ID	Form	ID	Form	ID	Form	ID	Form
1		32		42		51		55		59	
21		33		43		52		56		61	
22		34		44		53		57		62	
31		41		45		54		58		0	Andere Formen

Abbildung 4.12: Die erste Ziffer der ID beschreibt die Pixelzahl eines Clusters, die zweite ist eine Nummerierung. Alle anderen Formen werden in 0 zusammengefasst. Events ohne Pixeltreffer werden nicht berücksichtigt.

Elektronen mit gleicher Wahrscheinlichkeit auf. Die Energievariation beeinflusst die Häufigkeit kaum, weshalb im Folgenden die Energie der simulierten Myonen fest auf 10 GeV gesetzt wird.

Da die kosmischen Myonen in einer Messung an einem zufälligen Punkt auf den Chip treffen, wird zur besseren Vergleichbarkeit ein gleichverteilter Myonstrahl mit einem Radius von $r = 120 \mu\text{m}$ in der Simulation verwendet. Die Gleichverteilung stellt sicher, dass jeder Punkt innerhalb des Radius mit gleicher Wahrscheinlichkeit getroffen wird. Um Effekte durch den Aufbau von EPICAL-2 auszuschließen, werden nur Daten der nullten Lage verwendet, die sich an der Vorderseite des Detektors befindet. Abbildung 4.14 stellt die Häufigkeit der Clusterformen in Simulation und Daten dar. Der grundsätzliche Verlauf der Verteilungen ist gleich, jedoch weichen sie etwas voneinander ab. Während Clusterformen mit drei, vier und fünf Pixeltreffern in den Simulationen etwas häufiger auftreten als in Daten, treten Cluster mit eins, zwei und sechs Pixeltreffern in Daten etwas häufiger auf. Eine mögliche Ursache der Abwei-

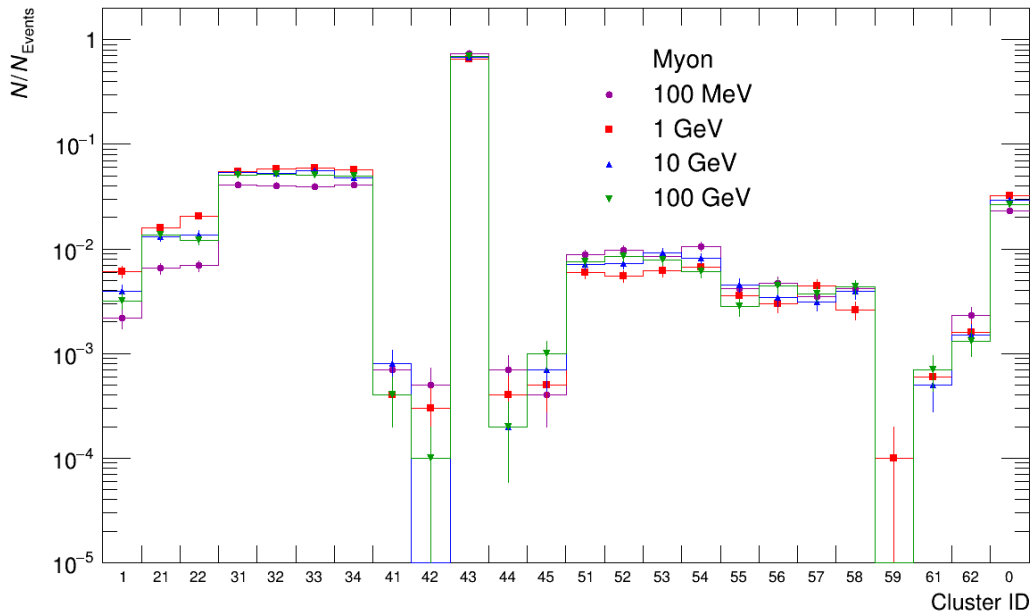


Abbildung 4.13: Die Häufigkeit der Clusterformen simulierter Myonen mit verschiedenen Energien.

chung sind Winkel der kosmischen Myonen, die auf EPICAL-2 treffen. Die Energie der Myonen beeinflusst die Häufigkeit der Clusterformen nur wenig, kann allerdings auch zur Abweichung beitragen. Sowohl in Daten als auch in Simulationen entstehen viele Cluster, die in der verwendeten Kategorisierung nicht erfasst werden.

4.8 Einfluss der Pixelgeometrie

Wie in Zusammenhang der Abbildungen 4.6 diskutiert, beeinflusst die rechteckige Form der Pixel des ALPIDE-Chips die Detektorantwort. Daher wird ein Testchip mit den gleichen Eigenschaften wie der ALPIDE-Chip simuliert, der allerdings quadratische Pixel der Dimension $26.88 \times 26.88 \mu\text{m}^2$ besitzt. Die Pixel des Testchips besitzen also die gleiche Ausdehnung in y-Richtung und eine um $2.36 \mu\text{m}$ reduzierte Ausdehnung in x-Richtung im Vergleich zu den Pixeln des ALPIDE-Chips. Der Effekt der unterschiedlichen Pixelgeometrie auf die Detektorantwort wird mit Hilfe der Häufig-

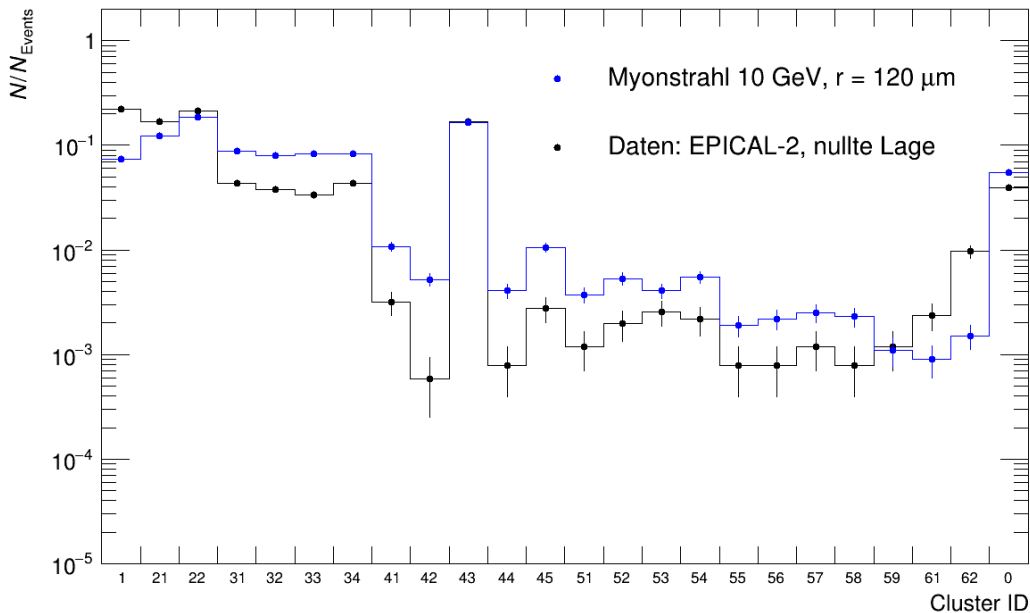


Abbildung 4.14: Die Häufigkeit von Clusterformen pro Event für simulierte Myonen im Vergleich zu Daten der nullten Lage von EPICAL-2.

keitsverteilungen von Clusterformen unter Verwendung eines gleichverteilten Myonstrahls mit einer Energie von 10 GeV untersucht. In der in Abbildung 4.12 eingeführten Clusterform-Kategorisierung treten Formen auf, die vertikal oder horizontal ausgerichtet sind. Vertikal ausgerichtete Cluster besitzen eine größere Ausdehnung in y-Richtung und horizontal ausgerichtete Cluster eine größere Ausdehnung in x-Richtung. Es wird erwartet, dass beim Testchip Formen in beiden Ausrichtungen gleich oft auftreten, während beim ALPIDE-Chip auf Grund der größeren x-Ausdehnung horizontale Formen etwas seltener auftreten. Da Pixeltreffer durch Diffusion von Ladungsträgern in der Epitaxialschicht entstehen, werden Pixel, die sich weiter von der Teilchenspur entfernt befinden, mit geringerer Wahrscheinlichkeit ausgelöst als näherliegende Pixel. Abbildung 4.15 zeigt die Häufigkeitsverteilungen der Clusterformen für einen einzelnen ALPIDE-Chip und den Testchip.

Wie erwartet treten im Testchip horizontal und vertikal ausgerichtete Formen mit gleicher Wahrscheinlichkeit auf. Insbesondere bei den Formen 51 bis 58 wird eine

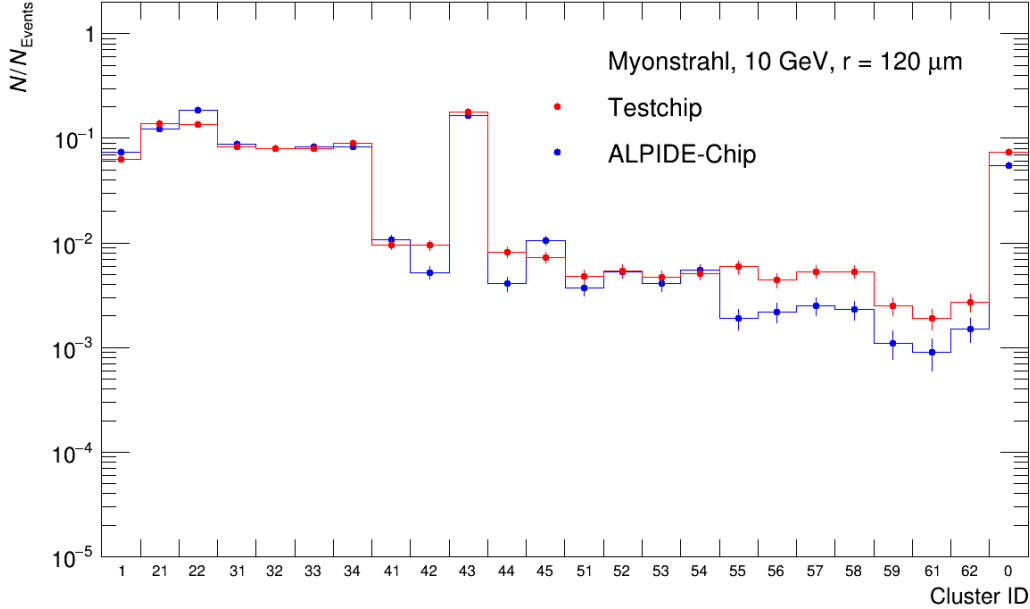


Abbildung 4.15: Die Häufigkeitsverteilung von Clusterformen durch Myonen für einen ALPIDE-Chip und einen Testchip mit quadratischen Pixeln.

klare Stufe in der Verteilung des ALPIDE-Chips beobachtet. Es zeigt sich, dass die Cluster häufiger auftreten, wenn der Abstand der Pixel in eine Richtung kleiner wird. Wenn die Pixel quadratisch sind, treten rotierte Varianten einer Form gleich häufig auf.

4.9 Parametrisierung von Clustern

Im ALPIDE-Chip tritt eine große Zahl verschiedener Clusterformen auf. Da es schwierig ist, jede mögliche Form zu betrachten, werden die Cluster im Folgenden durch Ellipsen parametrisiert. Die Detektorantwort lässt sich dann anhand der Eigenschaften der Ellipsen untersuchen. Bei analogen Detektoren wie dem EMCal, das zum ALICE-Experiment gehört, wird die Energieverteilung eines elektromagnetischen Schauers mit Hilfe von Ellipsen beschrieben [12]. In diesem Abschnitt wird die Anwendung dieser Methodik auf Cluster einzelner Schauerteilchen diskutiert. Die folgende Ellipsengleichung wird für die Parametrisierung von Clustern verwendet:

$$\frac{x^2}{\sigma_{\text{long}}^2} + \frac{y^2}{\sigma_{\text{short}}^2} = k \quad (4.1)$$

Die große Halbachse σ_{long} , die kleine Halbachse σ_{short} und der Skalierungsfaktor k sind die Parameter der Ellipsengleichung. Abbildung 4.16 stellt eine skalierte Ellipse und deren Halbachsen grafisch dar.

Die Ellipsen-Parameter lassen sich mit Hilfe der Kovarianzmatrix σ^2 berechnen, die eine Verallgemeinerung der eindimensionalen Varianz auf mehrere Dimensionen darstellt. Cluster sind zweidimensionale Objekte, weshalb die Kovarianzmatrix die Dimension 2×2 besitzt [13]. Die Einträge berechnen sich folgendermaßen:

$$\sigma_{ab}^2 = \sum_i \frac{w_i a_i b_i}{w_{\text{tot}}} - \sum_i \frac{w_i a_i}{w_{\text{tot}}} \sum_i \frac{w_i b_i}{w_{\text{tot}}} \quad (4.2)$$

Die Parameter a und b entsprechen den Indizes der Zellen oder Pixel eines Clusters, über die summiert wird. w_i beschreibt die gemessene Energie der i -ten Zelle und w_{tot}

ist ein logarithmisches Energiegewicht. Bei dem ALPIDE-Chip handelt es sich allerdings um einen digitalen Detektorchip, weshalb die Berechnung modifiziert werden muss. Für jeden ausgelösten Pixel gilt $w_i = 1$ und das Energiegewicht wird durch N_{Hits} ersetzt. Die Eigenwerte der Kovarianzmatrix entsprechen den Quadraten der Halbachsen: Der größere Eigenwert ist σ_{long}^2 , der kleinere Eigenwert ist σ_{short}^2 . Bei analogen Kalorimetern sind die Cluster 2D-Normalverteilt und der Skalierungsfaktor lässt sich für ein gewähltes Signifikanzniveau und eine gegebene Anzahl an Freiheitsgraden aus einer χ^2 -Tabelle ablesen [14][15]. Cluster haben zwei Freiheitsgrade, die Ausbreitung in x- und y-Richtung. Die räumliche Orientierung der Ellipse ergibt sich aus der Berechnung des Eigenvektors zum Eigenwert σ_{long}^2 . Der Winkel dieses Eigenvektors zur x-Achse ist gleich dem Winkel φ der großen Halbachse zur x-Achse [16]. In dieser Arbeit wird angenommen, dass Cluster des ALPIDE-Chips ebenfalls 2D-Normalverteilt sind. Die Berechnung der Ellipsengleichung eines Clusters wird mit den zuvor beschriebenen Schritten durchgeführt. Abbildung 4.17 stellt einen Cluster bestehend aus drei Pixeln sowie zwei Parametrisierungen dar: eine Ellipse mit Signifikanzniveau 1σ und eine Ellipse mit Signifikanzniveau 2σ .

Die Ellipsen unterscheiden sich nur durch ihren Skalierungsfaktor. Wird das Signifikanzniveau größer, so nimmt der Skalierungsfaktor zu. Dadurch nimmt die Wahrscheinlichkeit, dass alle Pixel sich innerhalb der Ellipse befinden, zu. Die Exzentrizität ε beschreibt die Kreisförmigkeit einer Ellipse und berechnet sich wie folgt:

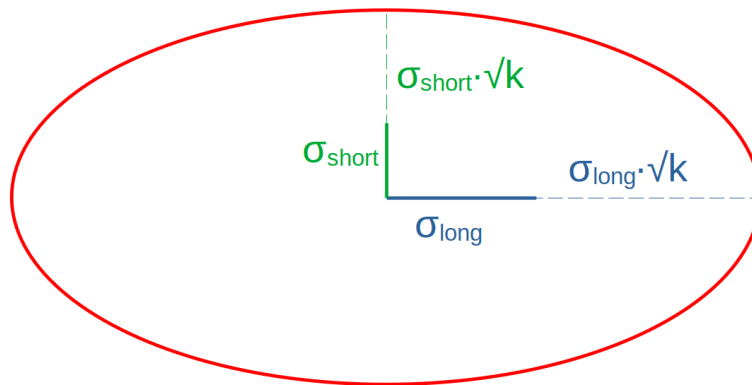


Abbildung 4.16: Eine Ellipse und deren große Halbachse σ_{long} und kleine Halbachse σ_{short} . Beide Achsen werden zur Skalierung mit \sqrt{k} multipliziert.

$$\varepsilon = \frac{\sqrt{\sigma_{\text{long}}^2 - \sigma_{\text{short}}^2}}{\sigma_{\text{long}}} \quad (4.3)$$

Für einen Kreis gilt $\varepsilon = 0$ und für eine Gerade $\varepsilon = 1$. Daraus ergibt sich eine neue Möglichkeit die Detektorantwort mit Hilfe von Exzentrizitätsverteilungen und σ_{long}^2 -Verteilungen zu untersuchen. Abbildung 4.18 zeigt, wie häufig welche Exzentrizitäten der Cluster-Ellipsen auftreten, wenn Elektronen mit 100 MeV mit dem Winkel θ auf den Chip treffen. Die verwendeten Winkel sind 0° , 40° , 60° und 80° . Abbildung 4.19 zeigt die σ_{long}^2 -Verteilungen dieser Ellipsen für die genannten Winkel. Die Energie wird so gewählt, dass die Elektronen auch bei großen Winkeln den Chip vollständig durchqueren.

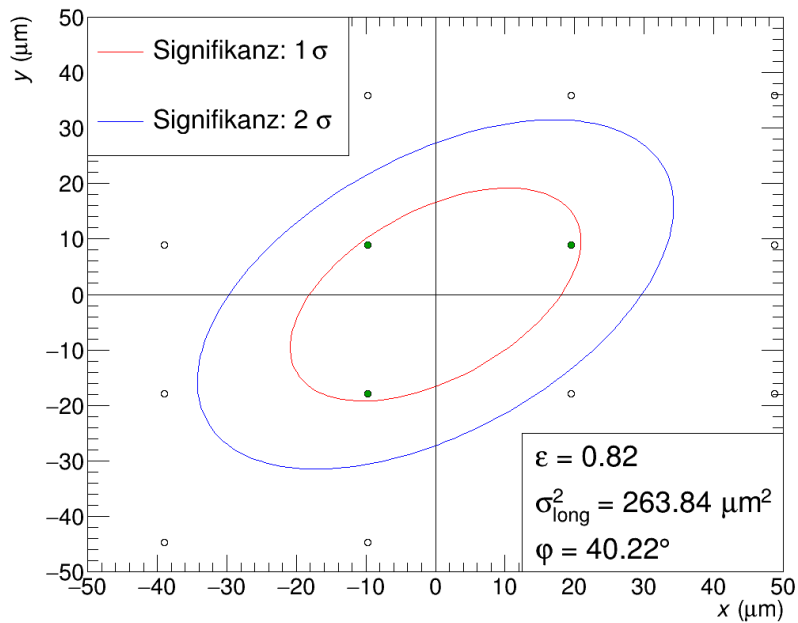


Abbildung 4.17: Die Parametrisierung eines Clusters bestehend aus drei Pixeltreffern durch zwei verschiedene Ellipsen. Die rote Ellipse hat das Signifikanzniveau 1σ , die blaue 2σ . Die Grün Punkte stellen Pixeltreffer dar, die offenen Marker die umliegenden Pixel, die nicht ausgelöst werden. Der Koordinatenursprung befindet sich im Schwerpunkt des Clusters. .

Wie zuvor bei den N_{Hits} -Verteilungen, ist eine Winkelabhängigkeit zu beobachten. Für $\theta = 0^\circ$ und $\theta = 40^\circ$ befindet sich das Maximum bei Exzentrizitäten von 0.35 bis 0.4, was sehr runden Clustern entspricht. Für $\theta = 60^\circ$ befindet sich das Maximum bei Exzentrizitäten von 0.8 bis 0.85 und für $\theta = 80^\circ$ bei 0.95 bis 1. Das bedeutet, dass mit steigendem Winkel die Ellipsen elliptischer werden, da die Elektronen sich zunehmend quer durch den Chip bewegen und entlang der Teilchenspur Pixel ausgelöst werden. Somit entstehen viele Cluster mit großer Länge im Verhältnis zu Breite und die Ellipse dieser Cluster weist eine große Exzentrizität auf.

Das Maximum der σ_{long}^2 -Verteilungen für $\theta = 0^\circ$ und $\theta = 40^\circ$ befindet sich bei Werten unterhalb von $500 \mu\text{m}^2$. Für $\theta = 60^\circ$ befindet sich das Maximum bei $500 \mu\text{m}^2$ bis $1000 \mu\text{m}^2$. Die Verteilungen für die drei Winkel fallen zu größeren Werten hin ab. Für $\theta = 80^\circ$ dagegen gibt es keine Ellipsen mit σ_{long}^2 unterhalb von $2000 \mu\text{m}^2$. Am häufigsten treten Werte von $4000 \mu\text{m}^2$ bis $4500 \mu\text{m}^2$ auf. Mit großen Winkeln entstehen sehr lange Cluster und somit auch Ellipsen mit einer großen langen Halbachse. Die Exzentrizitäts- und σ_{long}^2 -Verteilungen werden durch das gewählte Signifikanzni-

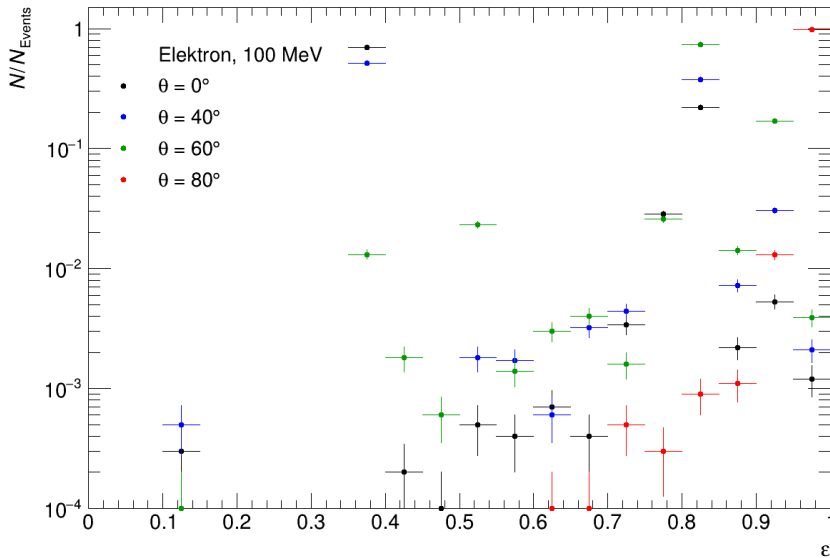


Abbildung 4.18: Die Häufigkeitsverteilung der Exzentrizitäten ε von Cluster-Ellipsen für vier verschiedene Winkel θ mit denen die Elektronen auf den Chip treffen. Mit zunehmendem Winkel nimmt das Maximum der Verteilung größere Werte an.

veau nicht beeinflusst und zeigen eine deutliche Winkelabhängigkeit, wie sie auch bei N_{Hits} -Verteilungen beobachtet wird. Bei großen Winkeln treten exzentrische und lange Cluster häufig auf, während bei kleinen Winkeln die Cluster runder und kompakter sind. Da die Wahrscheinlichkeit, dass ein Pixel ausgelöst wird, mit dem Abstand zur Teilchenspur abnimmt, werden bei kleinen Winkeln meistens wenige umliegende Pixel getroffen. Bei großen Winkeln befinden sich mehr Pixel in der Nähe der Teilchenspur, die mit großer Wahrscheinlichkeit getroffen werden. In einer Messung eines elektromagnetischen Schauers durch EPICAL-2 werden die Schauerteilchen mit einem zufälligen Winkel auf die einzelnen ALPIDE-Chips treffen.

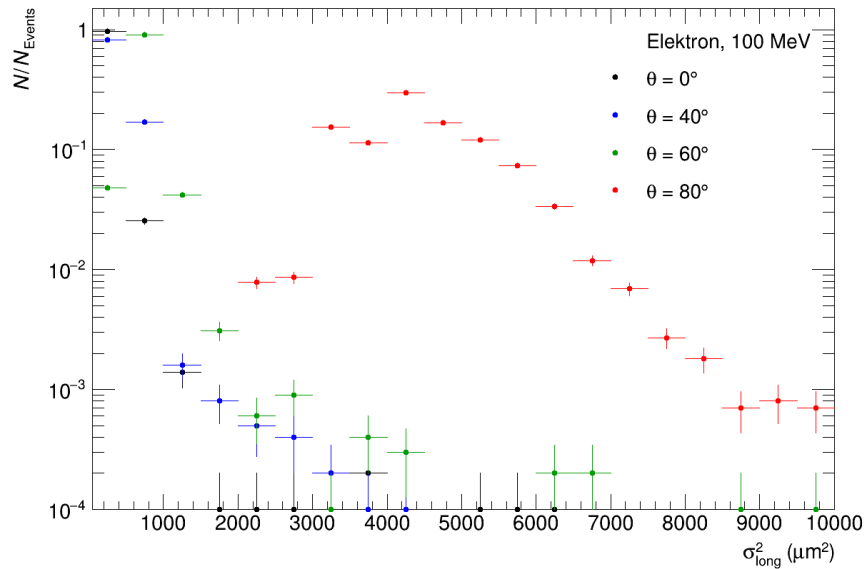


Abbildung 4.19: Die Häufigkeitsverteilung der Quadrate der langen Halbachse σ_{long} für vier verschiedene Winkel θ .

Kapitel 5

Zusammenfassung und Ausblick

Bei EPICAL-2 handelt es sich um ein digitales elektromagnetisches Kalorimeter, das im Rahmen des ALICE-FoCal Upgrades gebaut wurde, um den ALPIDE-Chip in Bezug auf dessen Ortsauflösung zu testen. Außerdem werden die Möglichkeiten eines rein digitalen Kalorimeters mit sehr feiner Ortsauflösung demonstriert. Mit EPICAL-2 werden elektromagnetische Schauer gemessen. Daher wird in dieser Arbeit die Detektorantwort eines einzelnen ALPIDE-Chips auf einzelne Schauerteilchen untersucht, um die Detektorantwort von EPICAL-2 besser zu verstehen. Dazu werden in Simulationen einzelne Elektronen, Positronen und Photonen auf den Chip geschossen. Zunächst wird die Energieabhängigkeit der Detektorantwort durch Variation der Teilchenenergien in einem Intervall von 1 keV bis 1 GeV untersucht. Im Anschluss wird die Position, an der die Teilchen auf den Chip treffen, variiert. Außerdem wird betrachtet, wie sich die Detektorantwort verhält, wenn die Teilchen mit unterschiedlichen Winkeln auf den Chip treffen. Zum Vergleich wird die Häufigkeit von Clusterformen in Simulation mit Daten von EPICAL-2 verglichen. Zuletzt wird die Methodik der Parametrisierung von Clusterformen auf den ALPIDE-Chip übertragen und zur Untersuchung der Detektorantwort verwendet.

Da sich die Detektorantwort aus der Anzahl der Pixeltreffer N_{Hits} sowie deren geometrische Anordnung zusammensetzt, werden diese beiden Observablen anhand von Häufigkeitsverteilungen untersucht. Die $\langle N_{\text{Hits}} \rangle$ -Verteilungen von Elektronen und Positronen zeigen die gleiche Energieabhängigkeit. Insbesondere unterhalb von 1 MeV liegt eine ausgeprägte Energieabhängigkeit vor. Oberhalb dieser Energie verlaufen die

Verteilungen ungefähr konstant. Die Verteilung der Photonen zeigt, dass der ALPIDE-Chip nicht darauf ausgelegt wurde, diese Teilchen zu messen. Bis auf ein kleines Maximum um 6 keV werden keine Pixeltreffer von Photonen verursacht.

Die Variation des Auftrittspunktes zeigt den Einfluss der Pixelgeometrie. Die Wahrscheinlichkeit, dass ein Pixel getroffen wird, hängt vom Abstand der Diode zur Teilchenspur ab. Je weiter die Diode entfernt ist, desto seltener wird sie einen Treffer registrieren. Da sich im zentralen Fall vier Pixel in kurzem Abstand zur Teilchenspur befinden, werden im Mittel häufig diese vier Pixel getroffen. Treffen die Teilchen zwischen zwei Dioden auf, werden diese beiden getroffen. Fliegt ein Teilchen direkt durch eine Diode, wird diese eine Diode ausgelöst. Es zeigt sich außerdem, dass die rechteckige Form der Pixel die Verteilungen beeinflusst. Da die Pixel in x-Richtung größer sind, werden im Mittel weniger Pixel getroffen, wenn die Position in x-Richtung variiert wird, als wenn sie in y-Richtung variiert wird.

Treffen Teilchen mit einem großen Winkel auf den Chip, durchqueren sie mehr Material. Dadurch steigt der totale Energieverlust an und es werden mehr Ladungsträger deponiert. Bei sehr großen Winkeln, wenn sich die Elektronen nahezu quer durch den Chip bewegen, befinden sich viele Dioden in der Nähe der Teilchenspur, die ausgelöst werden können. Deshalb nimmt die Anzahl der Pixeltreffer mit dem Winkel zu. Die Analyse der auftretenden Clusterformen zeigt, dass Elektronen, die gerade auf den Chip treffen, bevorzugt kompakte Formen verursachen. Die Form, die am häufigsten auftritt, hängt dabei von der Position ab, an der die Elektronen auf den Chip treffen. Die verwendete Kategorisierung von Clusterformen ist nur für kleine Winkel geeignet. Treffen die Elektronen mit einem Winkel auf den Chip werden größere Clusterformen verursacht, die in der Kategorisierung nicht auftreten. Bei kleinen Winkeln werden allerdings die relevantesten Formen betrachtet.

Für einen Vergleich zu Daten einer Messung kosmischer Myonen durch EPICAL-2 werden in der Simulation Myonen auf den ALPIDE-Chip geschossen. Die Häufigkeitsverteilungen von Clusterformen zeigen einen sehr ähnlichen Verlauf in Daten und Simulation. Jedoch weichen die Verteilungen etwas ab, was möglicherweise durch Winkel, mit denen die kosmischen Myonen auf den Chip treffen, verursacht wird. Mit den von Myonen verursachten Clusterformen wird außerdem der Einfluss der Pixelgeometrie auf die Detektorantwort untersucht. Dazu wird ein Testchip mit quadratischen Pixeln verwendet. Im ALPIDE-Chip treten Clusterformen unterschiedlich häufig auf,

je nachdem, ob sie horizontal oder vertikal ausgerichtet sind, während sie im Testchip mit gleicher Wahrscheinlichkeit auftreten.

Zuletzt werden in dieser Arbeit Clusterformen durch eine Ellipse parametrisiert, um nicht auf eine gewählte Kategorisierung von Clusterformen angewiesen zu sein, sondern die Detektorantwort mit Hilfe der Ellipsen-Parameter zu untersuchen. Dazu wird eine Methodik für analoge Kalorimeter auf den digitalen ALPIDE-Chip übertragen. Mit Hilfe von Exzentrizitäts- und σ_{long}^2 -Verteilungen wird die Detektorantwort in Abhängigkeit des Winkels, mit dem Elektronen auf den Chip treffen, untersucht. Die vorherigen Ergebnisse werden dabei bestätigt: Mit zunehmendem Winkel treten längere und elliptischere Cluster auf. Bei kleineren Winkeln dagegen treten Cluster auf, deren Ellipsen runder und kleiner sind.

In nachfolgenden Analysen kann anhand der Häufigkeit der auftretenden Clusterformen untersucht werden, ob sich der Clusterizer von EPICAL-2 optimieren lässt. Es kann in Simulationen die Detektorantwort von zwei Schauerteilchen, die gleichzeitig auf den Chip treffen, betrachtet werden, um ein Kriterium zu finden, wann ein Cluster von einem Teilchen und wann von mehreren Teilchen verursacht wird. Bei analogen Kalorimetern werden dazu σ_{long}^2 -Verteilungen verwendet. Eine zukünftige Analyse könnte untersuchen, ob sich diese Methodik ebenfalls auf ein digitales Kalorimeter mit sehr feiner Ortsauflösung übertragen lässt. Außerdem können weitere Vergleiche der Häufigkeit von Clusterformen mit Daten, wie denen der Teststrahl-Messung am Forschungszentrum DESY, durchgeführt werden. Dabei bietet es sich an, den leichten Unterschied zu den Daten kosmischer Myonen genauer zu untersuchen und die exakte Ursache zu finden.

Ein langfristiges Ziel ist die Entwicklung eines Modells für eine sogenannte Fast-Monte-Carlo Simulation. Die einzelnen Simulationsschritte, die in dieser Arbeit verwendet werden, werden in Simulationen von FoCal nicht möglich sein. Daher wird ein Modell benötigt, das anhand gegebener Eingangsparameter die Detektorantwort des ALPIDE-Chips generiert. Alternativ dazu wäre es möglich, eine umfassende Tabelle aller möglichen Formen für verschiedene Parameter zu erstellen.

Quellenverzeichnis

- [1] Hermann Kolanoski und Norbert Wermes. *Teilchendetektoren*. Springer-Verlag, 2016.
- [2] Francis Berghmans, Benoît Brichard, Alberto Fernandez Fernandez, A. Gusarov, Marco Uffelen, and Sylvain Girard. *An Introduction to Radiation Effects on Optical Components and Fiber Optic Sensors*, pages 127–165. Springer, 12 2007.
- [3] P.A. Zyla et al. Review of Particle Physics. *PTEP*, 2020(8):083C01, 2020.
- [4] P. Rocca and Francesco Riggi. *The Use of Avalanche Photodiodes in High Energy Electromagnetic Calorimetry*, page 251. IntechOpen, 03 2011.
- [5] CERN ALICE Collaboration. Letter of Intent: A Forward Calorimeter (FoCal) in the ALICE experiment. Technical report, CERN, Geneva, Jun 2020.
- [6] Gianluca Aglieri Rinella. The alpine pixel sensor chip for the upgrade of the alice inner tracking system. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, 845:583–587, 2017. Proceedings of the Vienna Conference on Instrumentation 2016.
- [7] CERN Electronic Systems for Experiments. ALICE-ITS. <https://ep-ese.web.cern.ch/project/alice-its>. [Online; Stand 13.02.2022].
- [8] A. van den Brink. Grafik von EPICAL-2.
- [9] Allpix². User Manual. <https://project-allpix-squared.web.cern.ch/project-allpix-squared/usermanual/allpix-manual.html>. [Online; Stand 14.02.2022].

- [10] T. Rogoschinski. Persönliche Kommunikation.
- [11] M. Ruis. Persönliche Kommunikation.
- [12] ALICE Collaboration. Production of π^0 and η mesons up to high transverse momentum in pp collisions at 2.76 tev. *The European Physical Journal C*, 77(5), May 2017.
- [13] Wikipedia. Kovarianzmatrix — wikipedia, die freie enzyklopädie, 2022. [Online; Stand 6. März 2022].
- [14] J. V. Wall. Practical Statistics For Astronomers: II. Correlation, Data-Modelling And Sample Comparison. https://ned.ipac.caltech.edu/level5/Wal12/Wal13_4.html. [Online; Stand 23.02.2022].
- [15] James Jones. Concepts of Statistics. <https://people.richland.edu/james/lecture/m170/tb1-chi.html>. [Online; Stand 23.02.2022].
- [16] Vincent Spruyt. How to draw an error ellipse representing the covariance matrix? <https://www.visiondummy.com/2014/04/draw-error-ellipse-representing-covariance-matrix/>. [Online; Stand 23.02.2022].

Danksagung

In erster Linie möchte ich mich bei Prof. Dr. Henner Büsching für die Aufnahme in der Arbeitsgruppe bedanken. Dies ermöglichte mir, eine Arbeit zu einem spannenden und aktuellen Thema im Rahmen des ALICE-Experiments zu schreiben und in einer internationalen Kollaboration zu einem neuen Detektor-Prototypen mitzuwirken. Somit konnte ich erste Erfahrungen des wissenschaftlichen Arbeitens in der experimentellen Teilchenphysik erlangen. Außerdem stand er immer für konstruktive und lehrreiche Gespräche zur Arbeit und über das wissenschaftliche Arbeiten im allgemeinen zur Verfügung. Besonderer Dank gilt Tim Rogoschinski, der mir den Einstieg ins wissenschaftliche Arbeiten erleichtert, mir bei physikalischen und technischen Fragestellungen immer weitergeholfen und Vorschläge für meine Analyse eingebracht hat. Dadurch habe ich viel über das Programmieren im Zusammenhang mit Simulationen und Datenanalyse, sowie das Präsentieren wissenschaftlicher Ergebnisse gelernt. Ich möchte mich für seine geduldige Unterstützung, die den Abschluss dieser Arbeit erleichtert hat, bedanken. Generell möchte ich das konstruktive Arbeitsumfeld in der gesamten Arbeitsgruppe loben. Es bestand jederzeit die Möglichkeit mit anderen Mitgliedern über meine Arbeit oder andere Themen zu diskutieren und somit ein besseres Verständnis zu erlangen, Wissen zu vertiefen und verschiedene Ideen in meine Analyse einfließen zu lassen.

Eigenständigkeitserklärung

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.

Ort, Datum

Unterschrift