
Einfluss von Pixelmaskierung auf die Performance des EPICAL-2 Kalorimeters

Masterarbeit

vorgelegt von
Dani Ateyeh

Johann Wolfgang Goethe Universität
Frankfurt am Main

2. Juli 2024

Erstgutachter: Prof. Henner Büsching
Zweitgutachter: Prof. Dr. Christoph Blume

Inhaltsverzeichnis

Einleitung	3
1 Theoretischer Hintergrund	5
1.1 Wechselwirkungen von Teilchen mit Materie	5
1.1.1 Photonen	5
1.1.2 Geladene Teilchen	7
1.1.3 Hadronen	9
1.2 Elektromagnetische Kalorimeter	10
1.2.1 Digitale Pixelkalorimeter	10
1.2.2 Energieauflösung	12
2 Experimenteller Aufbau	13
2.1 EPICAL-2 Kalorimeter	13
2.1.1 ALPIDE-Sensor	14
2.1.2 Auslese eines ALPIDE-Sensors	16
2.2 Teststrahlzeiten	17
3 Datenauswahl und Korrekturen	20
3.1 Datensatz	20
3.2 Clustering	21
3.3 Maskierung von Pixeln	21
3.4 Ausrichtung der ALPIDE-Sensoren	21
3.5 Inklinationskorrektur	22
3.6 Kalibration der ALPIDE-Sensoren	23
3.7 Ereignisselektion	24
3.7.1 DESY-Daten	24
3.7.2 SPS-Daten	25

4	Datenanalyse	27
4.1	Identifizierung fehlerhafter Pixel mit der Chip- Classification Methode	27
4.2	Identifizierung fehlerhafter Pixel mit einer Messung mit Teststrahl	28
4.3	Identifizierung fehlerhafter Pixel mit einer Messung ohne Teststrahl	30
4.4	Randeffekte im ALPIDE-Sensor	32
4.5	Pixelmaske	35
4.6	Kalorimeter Performance des EPICAL-2 Kalorimeters	35
4.7	Einfluss zufälliger Pixelmaskierungen auf die Kalorimeter Performance	36
4.8	Einfluss von Maskierungen im Bereich zwischen den ALPIDE-Sensoren auf die Kalorimeter Performance	38
4.9	Einfluss der EPICAL-2 Lagen auf die Kalorimeter Performance	39
4.9.1	Longitudinales Profil	40
4.9.2	Energieauflösung einer einzelnen Lage	40
4.9.3	Energieauflösung bei Maskierung einer Lage	41
4.9.4	Myon- und Hadronenauflösung	43
	Zusammenfassung	46
	Anhang	48
	Literatur	56

Einleitung

In der Detektorphysik spielen Kalorimeter eine entscheidende Rolle bei der Detektion von Teilchen, die bei hochenergetischen Kollisionen entstehen. Kalorimeter können Teilchen wie Elektronen, Positronen und Photonen detektieren. Üblicherweise messen Kalorimeter die in Zellen deponierte Energie, um die Energie eines primären Teilchen zu bestimmen.

Im Rahmen des ALICE-FoCal Detektor am CERN wurde ein Prototyp für ein Kalorimeter namens EPICAL-2 entwickelt. Es handelt sich um ein digitales elektromagnetisches Pixelkalorimeter, das auf Silizium-Sensoren basiert, die sogenannte ALPIDE-Sensoren. Jeder ALPIDE-Sensor besteht aus 512×1024 Pixeln. Die ALPIDE-Sensoren sind in insgesamt 24 Lagen und in Paaren hintereinander gestapelt. Wenn ein hochenergetisches Teilchen wie ein Elektron oder Photon auf Materie trifft, entsteht eine Kaskade von Sekundärteilchen. Diese Kaskade nennt sich elektromagnetischer Schauer und umfasst Elektronen, Positronen sowie Photonen. Die Anzahl der erzeugten Sekundärteilchen ist proportional zur Energie des ursprünglichen Teilchens. Im Gegensatz zu gewöhnlichen Kalorimetern misst das EPICAL-2 Kalorimeter die Anzahl der elektromagnetischen Schauerteilchen, die proportional zur Trefferanzahl ist.

Das EPICAL-2 Kalorimeter liefert Signale in Form von Pixeltreffern. Im EPICAL-2 Kalorimeter gibt es Pixel mit einem Pixeltreffer, obwohl sie kein Signal erhalten haben. Diese Pixel werden als verrauscht identifiziert. Andererseits gibt es auch Pixel, die auf Signale nicht reagieren. Diese Pixel werden als defekt identifiziert. Die Informationen über die fehlerhaften Pixel werden nach verschiedenen Kontrollen in einer Maske gespeichert, die in der vorliegenden Arbeit als Pixelmaske bezeichnet wird. Im Laufe der Zeit kann es vorkommen, dass weitere Pixel Fehlfunktionen zeigen. Um deren Auswirkung auf den Betrieb des EPICAL-2 Kalorimeters zu untersuchen, werden verschiedene Szenarien erstellt und analysiert.

In der vorliegenden Arbeit wird zunächst der erforderliche theoretische Hintergrund erläutert. Anschließend werden der experimentelle Aufbau und die Teststrahlzeiten des EPICAL-2 Kalorimeters beschrieben. Darüber hinaus werden Methoden für die Datenauswahl und für die Korrektur der aufgenommenen Daten vorgestellt. Im Anschluss werden die verschiedenen Methoden zur Erstellung der Pixelmaske erläutert.

Ziel dieser Arbeit ist die Untersuchung des Einflusses weiterer Pixelmaskierungen auf die Kalorimeter Performance, nämlich die Detektorantwort und Energieauflösung. Dabei werden

zufällig Pixel bzw. Spalten der ALPIDE-Sensoren maskiert. Zudem wird der Einfluss des Abstands zwischen zwei ALPIDE-Sensoren einer Lage auf die Kalorimeter Performance untersucht und schließlich wird der Einfluss der Maskierung einer kompletten Lage untersucht.

Kapitel 1

Theoretischer Hintergrund

1.1 Wechselwirkungen von Teilchen mit Materie

Im Standardmodell der Teilchenphysik sind bisher drei fundamentale Wechselwirkungen bekannt. Eine davon ist die elektromagnetische Wechselwirkung. Das Austauschteilchen der elektromagnetischen Wechselwirkung ist das Photon. Zur Detektion von Photonen oder elektrisch geladenen Teilchen wird die Wechselwirkung dieser Teilchen mit der Materie ausgenutzt. Das in dieser Arbeit verwendete EPICAL-2 Kalorimeter weist solche Teilchen mithilfe dieser Wechselwirkung nach. Dieses Unterkapitel stellt die Wechselwirkung von Photonen und elektrisch geladenen Teilchen sowie von Hadronen mit Materie vor.

1.1.1 Photonen

Photonen interagieren in vielfältiger Weise mit Materie. Abbildung 1.1 zeigt drei verschiedenen Wechselwirkungsarten des Photons mit der Materie als Abhängigkeit von der Kernzahl Z des Absorbermaterials und der Photonenenergie, nämlich den Photoeffekt, den Compton-Effekt und die Paarbildung. Jede Wechselwirkung ist in einem Energiebereich eingeschränkt. Die Bedeutung jeder Wechselwirkungsart wird im folgenden genauer beschrieben.

Photoeffekt

Beim Photoeffekt wird die Energie des einfallenden Photons auf ein Elektron der Elektronenhülle eines Atoms übertragen, dabei wird das Elektron befreit:

$$\gamma + \text{Atom} \rightarrow (\text{Atom})^+ + e^- \quad (1.1)$$

Erst wenn die Energie E_γ des Photons größer ist als die Bindungsenergie E_b des Elektrons, kann das Elektron aus der Atomhülle befreit werden. Die kinetische Energie des befreiten Elektrons

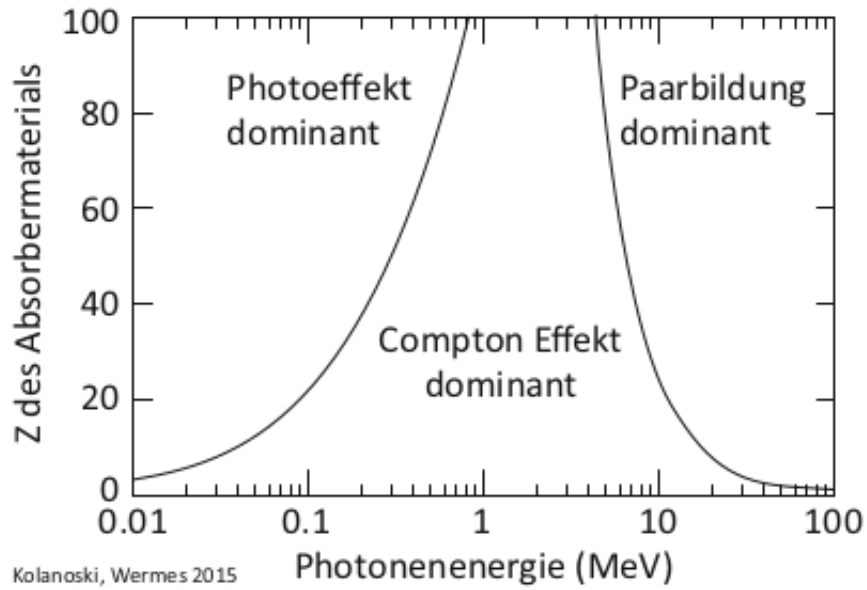


Abbildung 1.1: Wechselwirkungsbereiche der Photonen mit Materie in Abhängigkeit des Materials und der Photonenenergie [1].

ist folgende:

$$T = E_\gamma - E_b \quad (1.2)$$

Compton-Effekt

Beim Compton-Effekt wird ein Photon an einem freien oder quasi-freien Elektron gestreut. Ein Elektron wird als quasi-frei bezeichnet, wenn die Energie des Photons wesentlich größer ist als die Bindungsenergie des Elektrons. Die Energie E'_γ des Photons nach der Streuung an ein Elektron ist wie folgt definiert:

$$E'_\gamma = \frac{E_\gamma}{1 + \frac{E_\gamma}{m_e c^2} (1 - \cos \theta_\gamma)} \quad (1.3)$$

E_γ ist die Energie des Photons vor der Streuung, m_e die Masse des Elektrons und θ_γ der gestreute Winkel des Photons.

Paarbildung

Bei der Paarbildung wechselwirkt ein Photon mit dem Coulomb-Feld einer Ladung. Aus einem Photon wird ein Elektron und Positron erzeugt. Die Energie des Photons muss größer als die zweifache Masse des Elektrons sein.

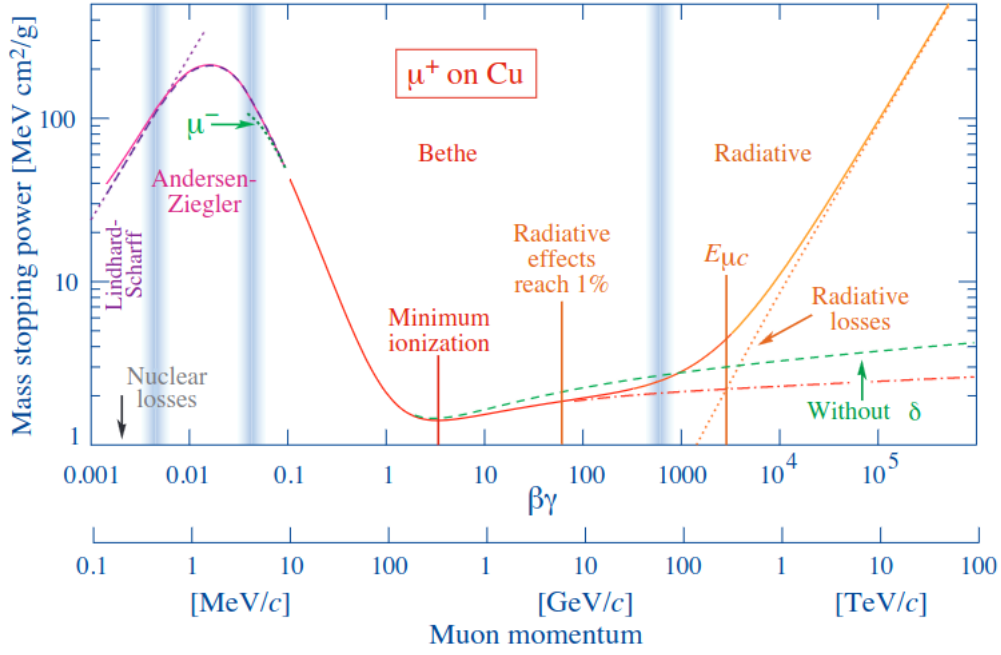


Abbildung 1.2: Energieverlust von durch Kupfer fliegenden Myonen als Funktion von $\beta\gamma$ oder als Funktion von ihrem Impuls [2].

1.1.2 Geladene Teilchen

Es gibt verschiedene Wechselwirkungen von geladenen Teilchen mit der Materie, die im folgenden Kapitel erklärt werden. Für schnelle geladene Teilchen wird der Energieverlust gut durch die Bethe-Bloch-Formel beschrieben, d.h. es dominiert der Energieverlust durch Ionisation und Anregung von Targetelektronen:

$$-\left\langle \frac{dE}{dx} \right\rangle = K \frac{Z}{A} \rho \frac{z^2}{\beta^2} \left[\frac{1}{2} \ln \frac{2m_e c^2 \beta^2 \gamma^2 T_{max}}{I^2} - \beta^2 - \frac{\delta(\beta\gamma)}{2} - \frac{C(\beta\gamma, I)}{Z} \right] \quad (1.4)$$

Z ist die Kernladungszahl und A die Massezahl des Mediums. T_{max} ist der maximale Energieübertrag auf ein Hüllenelektron und I die mittlere Anregungsenergie des Mediums. Die Terme $\delta(\beta\gamma)$ und $C(\beta\gamma)$ sind Korrekturterme jeweils für hohe und niedrige Energien. Abbildung 1.2 zeigt den mittleren Energieverlust pro Wegstrecke als Funktion von $\beta\gamma$ für Myonen, die durch Kupfer fliegen.

Die elektrisch geladenen Teilchen können durch Abstrahlung elektromagnetischer Quanten im Coulomb-Feld eines Kerns der Materie auch weiteren Energieverlust erfahren. Der Energiever-

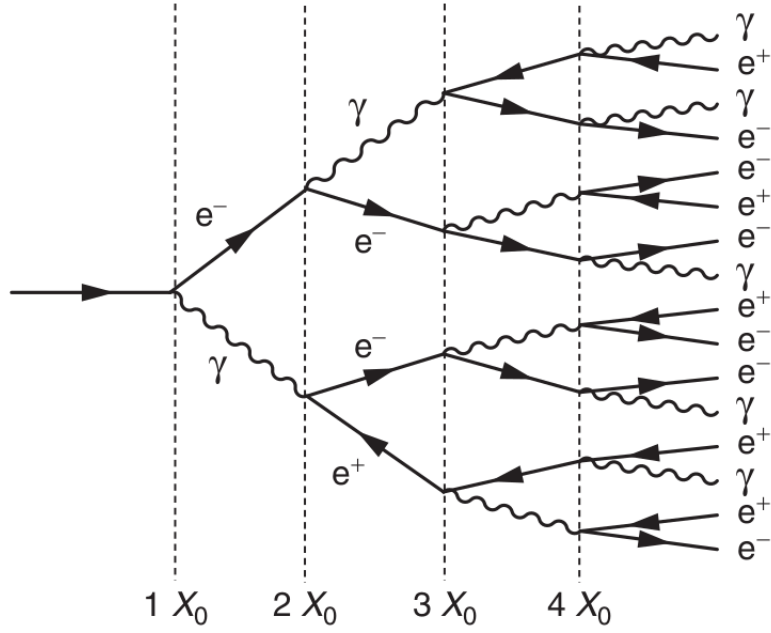


Abbildung 1.3: Entwicklung eines elektromagnetischen Schauers [3].

lust der elektrisch geladenen Teilchen durch Bremsstrahlung ist wie folgt beschrieben:

$$E(x) = E_0 e^{-\frac{x}{X_0}} \quad (1.5)$$

E_0 ist die ursprüngliche Energie des elektrisch geladenen Teilchens. X_0 ist die Strahlungslänge und bezeichnet die Strecke, in der die Energie des elektrisch geladenen Teilchens durch Strahlungsverluste auf E_0/e abgefallen ist. Die Strahlungslänge wird wie folgt berechnet [1]:

$$X_0 = \frac{716.408 \frac{\text{g}}{\text{cm}^{-2}}}{\rho} \frac{A}{Z(Z+1) \ln \frac{287}{\sqrt{Z}}} \quad (1.6)$$

ρ ist die Dichte des entsprechenden Materials, A seine Massenzahl, und Z die Kernzahl des Materials.

Nach der Wechselwirkung von elektrisch geladenen Teilchen mit der Materie wird Bremsstrahlung in Form von Photonen freigesetzt. Jedes Photon produziert anschließend ein e^+e^- -Paar. Die e^+e^- -Paare wechselwirken mit der Materie und erzeugen weitere e^+e^- -Paare. Die Anzahl der produzierten Teilchen vervielfacht sich, sodass eine Kaskade von Photonen, Elektronen und Positronen erzeugt wird. Diese Kaskade wird als elektromagnetischer Schauer bezeichnet. Abbildung 1.3 zeigt den schematischen Verlauf eines elektromagnetischen Schauers durch die Materie. Die Anzahl der produzierten Teilchen verdoppelt sich ungefähr nach jeder Strahlungslänge X_0 , während die mittlere Energie der produzierten nach einer Wegstrecke x wie in

[1] berechnet wird:

$$\langle E \rangle \approx \frac{E_0}{2^x} \quad (1.7)$$

E_0 ist die Energie von einem primären Photon, Elektron oder Positron.

Die Schauerteilchen wechselwirken so lange mit der Materie, bis sie eine kritische Energie E_c erreichen. Ab dieser Energie verlieren die Elektronen und Positronen des elektromagnetischen Schauers ihre Energien hauptsächlich durch Ionisation. Die maximale Anzahl der Teilchen ist nach einer Länge x_{max} erreicht und wird wie in [1] berechnet:

$$x_{max} = \frac{\ln(E/E_c)}{\ln 2} \quad (1.8)$$

1.1.3 Hadronen

Hadronen wechselwirken mit der Materie zum größten Teil über die starke Wechselwirkung. Ähnlich wie bei der elektromagnetischen Wechselwirkung wird bei der Wechselwirkung von Hadronen mit Materie ein hadronischer Schauer ausgelöst. Zusätzlich zerfallen einige Hadronen in Photonen, die wiederum e^+e^- -Paare erzeugen und mit der Materie wechselwirken, wie in Unterkapitel 1.1.2 beschrieben.

Analog zur elektromagnetischen Wechselwirkung kann für die Wechselwirkung von Hadronen mit der Materie eine Strahlungslänge definiert werden, nämlich die Absorptionslänge λ_a . Damit lässt sich die Anzahl der verbliebenen Teilchen mithilfe folgender Gleichung beschreiben [1]:

$$N(x) = N_0 e^{-x/\lambda_a} \quad (1.9)$$

N_0 bezeichnet die ursprüngliche Anzahl der Teilchen und x die zurückgelegte Wegstrecke.

Die Absorptionslänge wird aus dem inelastischen Wirkungsquerschnitt für hochenergetischen Hadronen bestimmt. Bei hohen Energien ist die Absorptionslänge etwa konstant und wird wie folgt berechnet:

$$\lambda_a = \frac{A}{N_A \rho \sigma_{inel}} \approx A^{-\frac{2}{3}} \quad (1.10)$$

In der vorliegenden Arbeit sind Wechselwirkungen von Hadronen mit der Detektormaterie unerwünscht, weil das EPICAL-2 Kalorimeter ein elektromagnetisches Kalorimeter ist. Deshalb werden verschiedene Methoden verwendet, um die Hadronen größtenteils auszuschließen. Wie die Hadronen aussortiert werden, wird im Unterkapitel 3.7 erklärt.

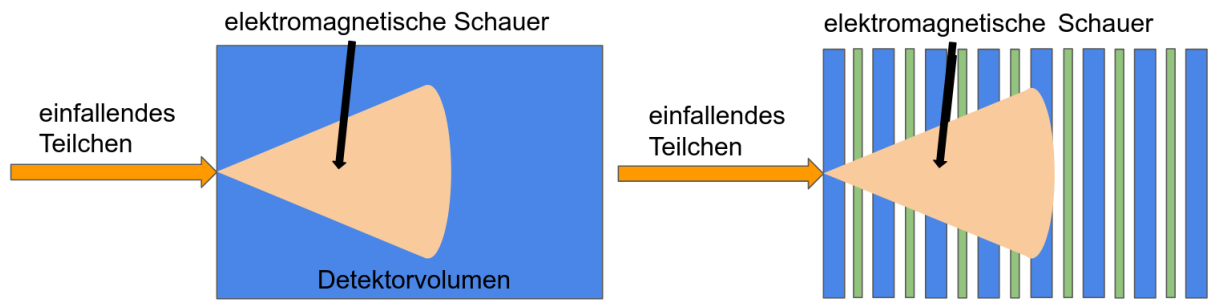


Abbildung 1.4: Grafik eines homogenen Kalorimeters (links) und eines Sampling-Kalorimeters (rechts).

1.2 Elektromagnetische Kalorimeter

In der Hochenergiephysik wird die Energie von Elektronen und Photonen üblicherweise mit elektromagnetischen Kalorimetern gemessen. Es gibt zwei Kategorien von elektromagnetischen Kalorimetern, die homogene und die Sampling-Kalorimeter. Beide messen die deponierte Energie der in der Materie produzierten Teilchen.

Homogene elektromagnetische Kalorimeter verwenden meistens anorganische Szintillatoren, die üblicherweise aus Bleiwolframat (PbWO_4) bestehen. Die Entwicklung der elektromagnetischen Schauer und der Nachweis der Schauerteilchen wird in homogenen Kalorimetern von nur einem Medium erfüllt. Die elektromagnetischen Schauer werden in Form von Szintillationslicht mithilfe von Photodetektoren nachgewiesen. Die Menge des Szintillationslichtes ist proportional zur gesamten Energie des primären Elektrons bzw. Photons. Abbildung 1.4 (links) zeigt den schematischen Aufbau eines homogenen Kalorimeters, in welchem ein elektromagnetischer Schauer entsteht.

Sampling-Kalorimeter verwenden hingegen abwechselnde Schichten aus passivem Absorber, in dem der elektromagnetische Schauer erzeugt wird, und Schichten aus aktivem Material, um die Ionisation durch Elektronen zu messen. Passive Absorber bestehen meistens aus Materialien hoher Dichte, wie zum Beispiel aus Wolfram (W) oder Blei (Pb). Aktive Materialien verwenden üblicherweise Plastik-Szintillatoren oder Silizium-Detektoren. Abbildung 1.4 (rechts) zeigt die schematische Abwechslung von Schichten eines Sampling-Kalorimeters, in dem ein elektromagnetischer Schauer entsteht. Das in der vorliegenden Arbeit verwendete EPICAL-2 Kalorimeter ist ein digitales Pixelkalorimeter, das als Sampling-Kalorimeter betrachtet werden kann. Im nächsten Unterkapitel werden die digitale Pixelkalorimeter vorgestellt.

1.2.1 Digitale Pixelkalorimeter

Digitale Pixelkalorimeter repräsentieren eine spezielle Klasse elektromagnetischer Kalorimeter, die sich durch eine verbesserte Ortsauflösung des elektromagnetischen Schauers im Vergleich

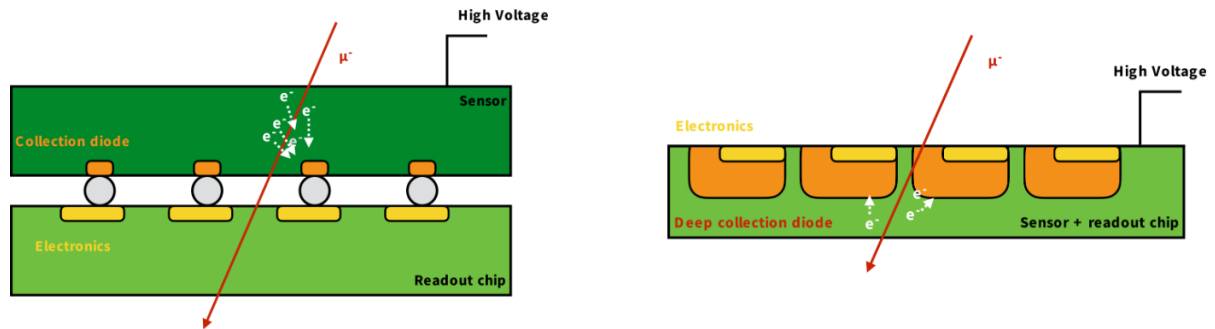


Abbildung 1.5: Grafik eines hybriden Pixeldetektors (links) und eines monolithisch aktiven Pixeldetektors (rechts) [6].

zu herkömmlichen elektromagnetischen Kalorimetern auszeichnen. Ihre Funktionsweise beruht auf der Erfassung und Auszählung der Teilchen in elektromagnetischen Schauern zur Bestimmung der Energie des primären Teilchens.

Für den Aufbau von digitalen Pixelkalorimetern sind Dioden von großer Bedeutung. Dioden sind Halbleiterbauelemente, die auf einem pn-Übergang basieren. Der pn-Übergang entsteht durch Kombination eines p-dotierten und eines n-dotierten Halbleiterbereichs [4]. Bei der n-Dotierung werden Siliziumatome durch Elemente wie Phosphor oder Arsen ersetzt. Diese Elemente besitzen ein zusätzliches Elektron im Vergleich zum Silizium. Dieses zusätzliche Elektron ist schwach gebunden und kann leicht als freier Ladungsträger zur elektrischen Leitfähigkeit beitragen. Da diese freien Elektronen negativ geladen sind, wird der Bereich als n-dotiert bezeichnet [5]. Bei der p-Dotierung hingegen werden Siliziumatome durch Elemente wie Bor oder Gallium ersetzt. Diese Elemente besitzen ein Elektron weniger als Silizium. Das Fehlen eines Elektrons erzeugt sogenannte Löcher, die als positive Ladungsträger fungieren. Diese Löcher können sich durch das Kristallgitter bewegen, wenn benachbarte Elektronen in die Löcher eindringen. Da diese Löcher als positive Ladungsträger betrachtet werden, wird der Bereich als p-dotiert bezeichnet [5]. Die p-dotierten Bereiche in einem Silizium-Pixeldetektor dienen dazu, die durch einfallende Teilchen erzeugten Löcher anzuziehen und zu erfassen.

Digitale Pixelkalorimeter verwenden Silizium-Pixeldetektoren, die üblicherweise in der Teilchenspurfundung Anwendung finden. Silizium-Pixeldetektoren bestehen aus einer Matrix von Pixelsensoren, die einzelne Teilchen detektieren können. In jedem Pixelsensor sind Diode integriert. Beim Auftreffen eines geladenen Teilchens auf den Pixelsensor entstehen Elektron-Loch-Paare (e-h-Paare), die von Dioden erfasst werden.

Es existieren zwei Arten von Silizium-Pixeldetektoren: hybride Pixeldetektoren und monolithisch aktive Pixeldetektoren (MAPS). Monolithische Pixeldetektoren integrieren mehrere Komponenten, darunter eine Silizium-Ebene mit einer Matrix von Pixelsensoren und eine Ebene mit Ausleseelektronik, die miteinander verbunden sind. Abbildung 1.5 (links) zeigt den schematischen Aufbau eines hybriden Pixelsensors. Im Gegensatz dazu bestehen monolithische aktive

Pixeldetektoren (MAPS) aus einer einzigen Siliziumschicht, die sowohl die Pixelsensoren als auch das Auslesesystem enthält. Zur Erzeugung der Ladungsträger wird typischerweise eine Epitaxieschicht zwischen den Pixelsensoren und der Ausleseelektronik platziert. Abbildung 1.5 (rechts) zeigt den schematischen Aufbau eines MAPS. In diesem Aufbau befinden sich die Dioden im Sensorbereich, während die Ausleseelektronik auf den Dioden angeordnet ist. Eine detaillierte Erläuterung zur Funktionsweise und Auslesung eines Pixelsensors wird in den Unterkapiteln 2.1.1 und 2.1.2 bereitgestellt.

1.2.2 Energieauflösung

Beim Bau eines elektromagnetischen Kalorimeters ist die Energieauflösung ein wichtiges Qualitätsmerkmal. Bei der Bestimmung der Energieauflösung wird berücksichtigt, dass die Anzahl N_S der produzierten Teilchen im elektromagnetischen Schauer proportional zur Energie E des primären Teilchens ist. Deshalb gilt folgende Relation für die Energieauflösung [1]:

$$\frac{\sigma_E}{E} \propto \frac{\sqrt{N_S}}{N_S} \propto \frac{1}{\sqrt{N_S}} \propto \frac{1}{\sqrt{E}} \quad (1.11)$$

Allgemein lässt sich die Energieauflösung eines elektromagnetischen Kalorimeters wie in [1] beschreiben:

$$\frac{\sigma_E}{E} = \frac{a}{\sqrt{E}} \oplus \frac{b}{E} \oplus c \quad (1.12)$$

a ist ein freier Parameter und beschreibt stochastische Fluktuationen in der Entwicklung von Schauern. b ist auch ein freier Parameter und beschreibt das elektronische Rauschen, dessen energieunabhängige absolute Fluktuationen zu einem $1/E$ Beitrag zur Auflösung führen. c ist eine Konstante und beschreibt die mechanische und elektronische Unregelmäßigkeiten und Fluktuationen in den Leckverlusten. Die ersten beiden Terme in der Gleichung 1.12 machen sich bei kleinen Energien bemerkbar, während der konstante Term bei hohen Energien wichtig ist.

In der vorliegenden Arbeit beschreibt die Gleichung 1.12 die Energieauflösung des EPICAL-2 Kalorimeters. Sie stellt außerdem die Basis dieser Arbeit dar. Im Unterkapitel 4.6 wird die EPICAL-2 Kalorimeter Performance vorgestellt, wobei die Energieauflösung ein wesentlicher Bestandteil ist.

Kapitel 2

Experimenteller Aufbau

In der vorliegenden Arbeit wird ein Prototyp für ein digitales Pixelkalorimeter namens EPICAL-2 verwendet. In diesem Kapitel werden der experimentelle Aufbau des EPICAL-2 Kalorimeters und seine einzelnen Komponenten beschrieben. Anschließend wird erklärt, wie mit dem EPICAL-2 Kalorimeter die Teststrahlungsmessungen an zwei verschiedenen Beschleunigeranlagen durchgeführt wurden.

2.1 EPICAL-2 Kalorimeter

Das EPICAL-2 Kalorimeter ist ein Prototyp für ein digitales Pixelkalorimeter, das im Rahmen des ALICE-FoCal Projekts gebaut wurde. Im Vergleich zu herkömmlichen Kalorimetern bietet das EPICAL-2 Kalorimeter eine verbesserte Ortsauflösung für Schauerteilchen. Eine Einführung in digitale Pixelkalorimeter wurde bereits im Unterkapitel 1.2.1 gegeben. Abbildung 2.1 (oben) zeigt das EPICAL-2 Kalorimeter, dessen Detektorsystem sich in der Mitte befindet. Das Detektorsystem hat den Aufbau eines Sampling-Kalorimeters und besteht aus insgesamt 24 Lagen, die entlang der z-Achse positioniert sind.

Abbildung 2.1 (unten) zeigt die einzelnen Komponenten einer Lage. Jede einzelne Lage besteht aus einem $40 \times 40 \times 3 \text{ mm}^3$ Wolfram-Absorber. Lage 0 ist die einzige Lage, vor der sich kein Absorber befindet. Der Absorber ermöglicht durch Wechselwirkung mit den eintreffenden Elektronen und Photonen eine Verstärkung des elektromagnetischen Schauers mittels Bremsstrahlung und Paarbildung. Auf dem Absorber sind zwei MAPS, sogenannte ALPIDE-Sensoren, mit einem minimalen Abstand von ca. $100 \text{ }\mu\text{m}$ zueinander befestigt. Der Absorber ist so konstruiert, dass er auf zwei entgegengesetzte Seiten um 0.5 mm dicker ist, damit die ALPIDE-Sensoren geschützt werden, wenn die Lagen gestapelt werden. Jeder ALPIDE-Sensor ist mit einer Nummer (Chip-ID) gekennzeichnet, deren Zuordnung zu den ALPIDE-Sensoren im Anhang zu finden ist. Anschließend kommt ein Substrat zur Befestigung der Komponenten. Um den Detektor herum befindet sich eine Aluminiumschicht, die die Temperatur während der

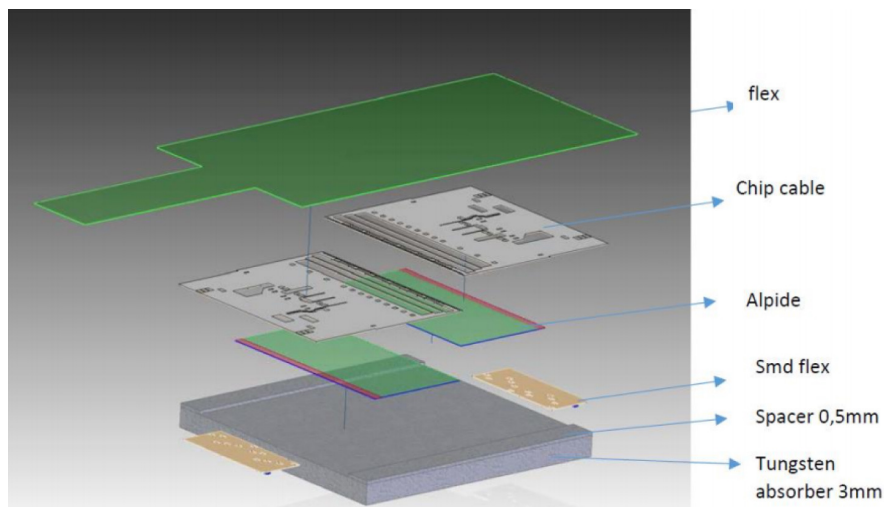
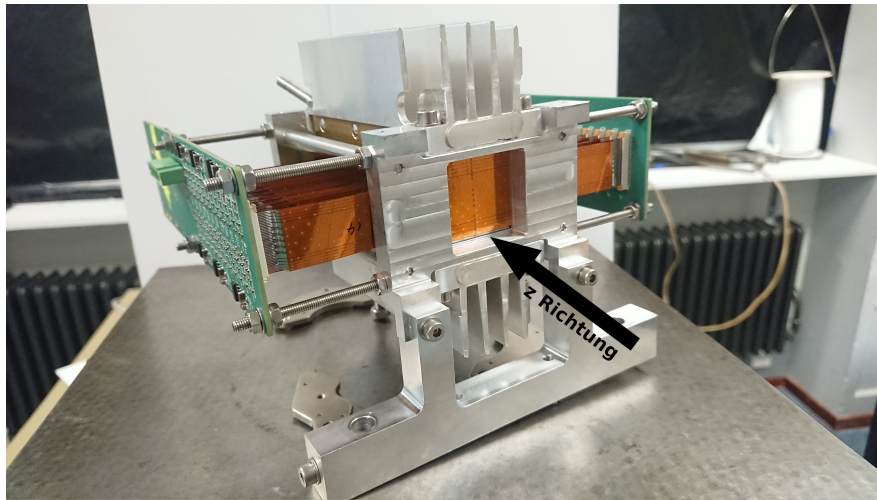


Abbildung 2.1: Aufbau des EPICAL-2 Kalorimeters (oben) und einer einzelnen EPICAL-2 Lage (unten) [7].

Messungen regulieren kann.

Zur Bestimmung der Energie eines primären Teilchens, das auf das EPICAL-2 Kalorimeter trifft, wird die Anzahl der Schauerteilchen gezählt. Die Anzahl der Schauerteilchen ist proportional zur Energie des primären Teilchens wie in Unterkapitel 1.2 beschrieben. Wie die Schauerteilchen mithilfe der ALPIDE-Sensoren nachgewiesen werden, wird im nächsten Unterkapitel erklärt.

2.1.1 ALPIDE-Sensor

ALPIDE-Sensoren (ALICE Pixel Detector) sind monolithische aktive Pixelsensoren (MAPS). Eine Einführung zu den MAPS wurde bereits in Unterkapitel 1.2.1 gemacht. Der ALPIDE-Sensor wurde für das ALICE Inner Tracking System am CERN-LHC entwickelt und wird zur Spurfundung von Teilchen verwendet.

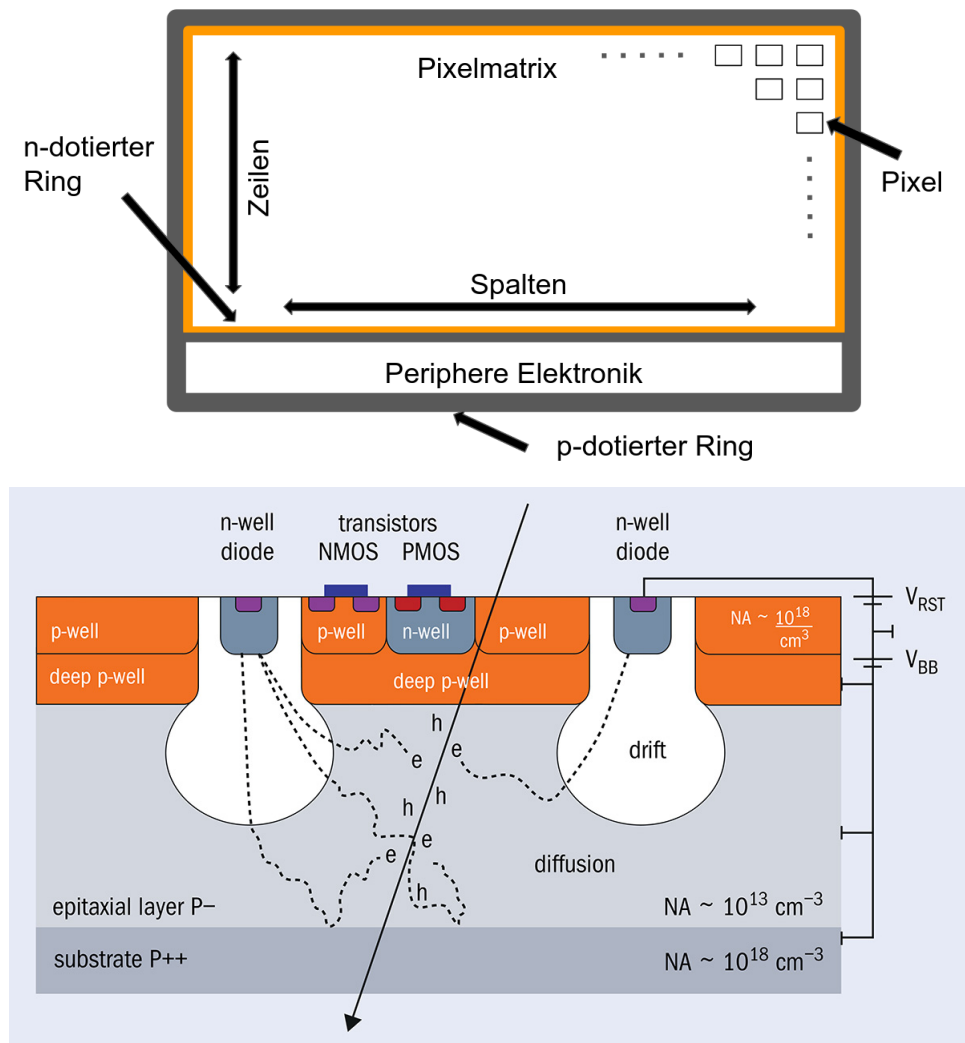


Abbildung 2.2: Grafik eines ALPIDE-Sensors (oben) und Querschnitt eines ALPIDE-Sensors (unten) [8].

Abbildung 2.2 (oben) zeigt einen schematischen Aufbau eines ALPIDE-Sensors. Er hat die Größe von $15 \times 30 \text{ mm}^2$, wobei $13.8 \times 29.9 \text{ mm}^2$ die sensitive Fläche ist. Jeder ALPIDE-Sensor besteht aus einer Matrix von 1024×512 Pixeln, wobei jeder Pixel die Größe von $29.24 \mu\text{m} \times 26.88 \mu\text{m}$ hat. In der vorliegenden Arbeit wird die Achse, die 1024 Pixel enthält, als Spalte bezeichnet und die Achse, die 512 Pixel enthält, als Reihe. Um der Pixelmatrix besitzt der ALPIDE-Sensor einen n-dotierten Ring, der die Matrix vom Rest des ALPIDE-Sensors schützt. Auf einer peripheren Seite sind die Schaltkreise platziert, um die von der sensitive Fläche erzeugtes Signal auszulesen. Für den weiteren Schutz der Elektronik wird ein p-dotierter Ring um den n-dotierten Ring gelegt.

Abbildung 2.2 (unten) zeigt den Querschnitt eines ALPIDE-Sensors. Jedes Pixel besteht aus einem $25 \mu\text{m}$ dicken aktivem Material, der sogenannten Epitaxialschicht. Die Epitaxialschicht liegt auf einer $14 \mu\text{m}$ dicken Substratschicht. Auf der Epitaxialschicht befindet sich eine Metall-

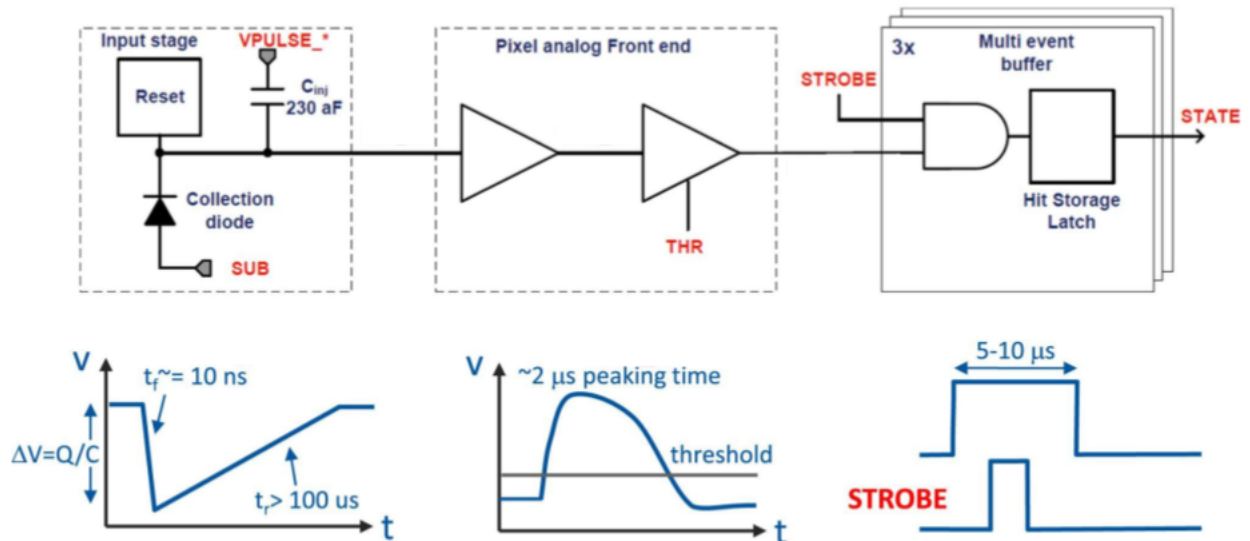


Abbildung 2.3: Illustration des Schaltkreises eines Pixels sowie der zeitliche Verlauf eines Signals[9].

schicht, die aus Transistoren sowie aus n- und p-dotierten Dioden besteht.

Wenn ein geladenes Teilchen durch die Epitaxieschicht fliegt, erzeugt es Elektron-Loch-Paare (e-h-Paare). Die Ladungsträger diffundieren in der Epitaxieschicht, bis sie von einer Drift-Region, der sogenannten Verarmungszone, aufgenommen werden. Dies geschieht beim Anlegen eines positiven Potentials von etwa $V_{RST} = 1 \text{ V}$ im n-p-Dotierungsbereich und eines negativen Potentials von $V_{BB} = -6 \text{ V}$ im Substrat.

Eine weitere p-Dotierung, die sogenannte tiefe p-Dotierung, wird zwischen der bereits angelegten p-dotierte Diode und der Epitaxieschicht eingefügt, um die Diode von der Epitaxieschicht zu schützen. Sie schützt jedoch nicht die n-dotierte Elektrode, die in der Verarmungszone liegt. Das gesamte Signal, was in diesem Pixel erzeugt wird, wird als Pixeltreffer bezeichnet. Wie die Pixel ausgelesen werden und wann es zu einem Pixeltreffer kommt, wird im nächsten Abschnitt erklärt.

2.1.2 Auslese eines ALPIDE-Sensors

ALPIDE-Sensoren können Information über die genaue Position eines auf ihr einfallenden Teilchens durch Aussenden eines Signals liefern. Die Messung der Signale erfolgt durch Auslesen einer Matrix von Pixeltreffern. Jedes Pixel enthält einen Verstärker, einen Konverter, der das analoge Signal digitalisiert, sowie einen Speicherort.

Abbildung 2.3 veranschaulicht den schematischen Aufbau des Schaltkreises eines Pixels sowie der zeitliche Verlauf eines Signals. Zunächst wird das Pixelsignal, das ungefähr 10 ns dauert, in der Elektrode zurückgesetzt. Die Wiederherstellung des Pixelsignals dauert ungefähr 100 ns. Anschließend wird das Signal verstärkt und ein Schwellenwert gesetzt, sodass nur Signale über diesem Schwellenwert ausgewählt werden. Üblicherweise liegt der Zeitbereich des Signals, das über dem Schwellenwert liegt, bei $5 < t < 10 \mu\text{s}$. Signale, die über dem Schwellenwert liegen, werden für die weitere Bearbeitung digitalisiert. Das digitale Signal wird mit einem externen Signal verglichen und ein Pixeltreffer registriert, wenn das externe Signal und das digitale Signal überlappen. Die digitalen Signale aller Pixel werden in einem Zwischenort gespeichert bis sie von der weiteren Elektronik ausgelesen werden.

2.2 Teststrahlzeiten

Das EPICAL-2 Kalorimeter wurde insgesamt in drei verschiedenen Orten verwendet, in zwei Beschleunigeranlagen und an der Utrecht Universität in den Niederlanden. An der Utrecht Universität wurde eine kosmische Myonenmessung durchgeführt. In der vorliegenden Arbeit wird auf die Myonenmessung nicht näher eingegangen.

Beschleunigeranlagen sind große Einrichtungen, die die Erzeugung von relativistischen Teilchen ermöglichen. Das DESY und das CERN-SPS sind solche Einrichtungen, deren Messaufbau in den nächsten zwei Abschnitten genauer erklärt wird.

Messung am DESY II

In Hamburg wurde im Jahr 2020 das EPICAL-2 Kalorimeter am TB22 Strahl der Beschleunigeranlage DESY II installiert. In der Abbildung 2.4 ist der experimentelle Aufbau am DESY zu sehen und wie der Elektronenstrahl für die EPICAL-2 Messung erzeugt wurde. Es wurden e^+ und e^- Strahlen verwendet, die auf ein primäres Target treffen und dort Bremsstrahlung erzeugen. Die Photonen, die aus der Bremsstrahlung erzeugt wird, fliegen tangential auf ein zweites Target, das entweder aus Kupfer oder Aluminium besteht, um dort e^+e^- -Paare erzeugt. Mit Verwendung eines Dipolmagneten können die beiden Teilchenstrahlen aussortiert werden. Anschließend wird ein Kollimator verwendet, der den Elektronenstrahl parallelisiert. Zum Schluss durchquert der Elektronenstrahl einen zweiten Kollimator, bevor er das Kalorimeter erreicht. Insgesamt wurden Strahlen mit Energien von 1.0 bis 5.8 GeV gemessen. Außerdem wurden auch Daten unter Abwesenheit des Elektronenstrahls aufgenommen, um das Rauschen des Detektors zu untersuchen.

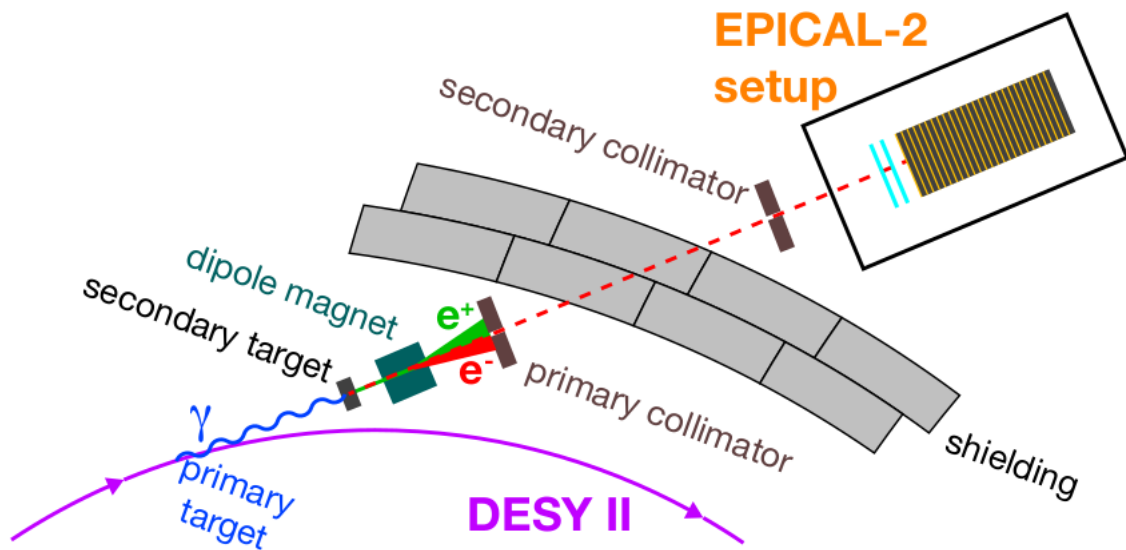


Abbildung 2.4: Veranschaulichung der Teststrahlungsmessung am DESY II [10]

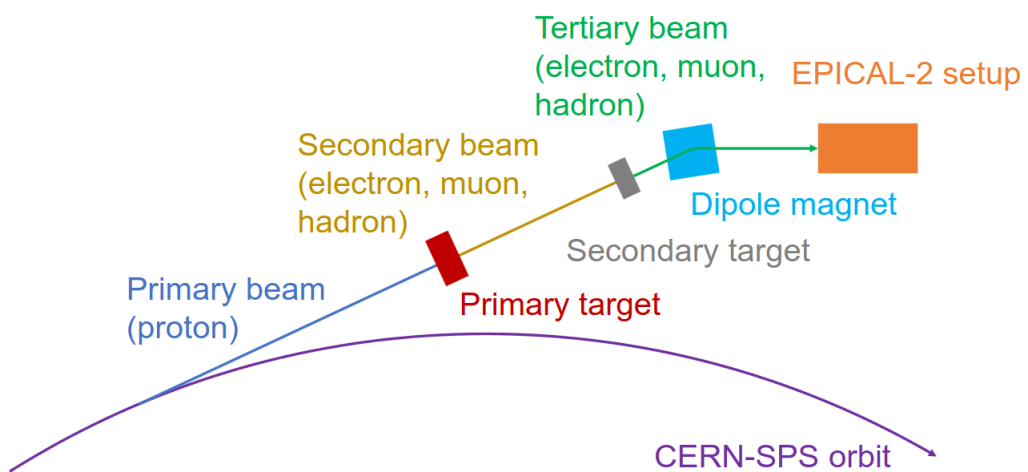


Abbildung 2.5: Veranschaulichung der Teststrahlungsmessung am CERN-SPS [15]

Messung am CERN-SPS

Ähnlich wie am DESY wurde auch am CERN-SPS (Super Proton Synchrotron) eine Messung beim EPICAL-2 Kalorimeter im September und Oktober 2021 am Strahl H6 durchgeführt. Abbildung 2.5 zeigt die Teststrahlmessung am CERN-SPS. Ein primäres Target aus Beryllium wird von einem Proton mit der Energie $E_{\text{SPS,prim}} = 120 \text{ GeV}$ getroffen. Nach der Reaktion wird ein zweites Target getroffen. Anschließend wird ein Strahl erzeugt, der aus einer Mischung aus Elektronen, Myonen und Hadronen besteht. Der Strahl geht durch einen Dipolmagneten, wo der Elektronenstrahl selektiert wird und auf das EPICAL-2 Kalorimeter trifft. Am EPICAL-2 wurden Messungen mit Energien zwischen 20 und 80 GeV durchgeführt.

Kapitel 3

Datenauswahl und Korrekturen

Im Unterkapitel 2.2 wird erklärt, wie die Daten mit dem EPICAL-2 Kalorimeter aufgenommen wurden. In diesem Kapitel wird der Datensatz vorgestellt, der in der vorliegenden Arbeit verwendet wird. Die Daten werden von verschiedenen Effekten beeinflusst, die an die EPICAL-2 Kalorimeter Performance Auswirkung haben. Deshalb werden verschiedene Korrekturmethode verwendet, die im Folgenden aufgelistet sind:

- Maskierung von Pixeln
- Bestimmung der Ausrichtung der ALPIDE-Sensoren
- Inklinationskorrektur
- Chip-Kalibration
- Ereignisselektion

Für die Ereignisselektion wird auch ein Clusteralgorithmus verwendet, der in diesem Kapitel kurz erläutert wird. Anschließend werden die einzelnen Korrekturmethode sowie die Selektionsverfahren vorgestellt.

3.1 Datensatz

Die Datenerfassung an den Beschleunigeranlagen DESY und CERN-SPS erfolgte in Zeitperioden, die als Runs bezeichnet werden. In den Tabellen 4.1 und 4.2 im Anhang sind alle Runs aufgelistet, die in der vorliegenden Arbeit verwendet werden. In der Tabelle 4.1 sind alle Runs aufgeführt, bei denen ein Teststrahl verwendet wurde, während Tabelle 4.2 alle Runs umfasst, bei denen eine Teststrahlmessung ohne einen Teststrahl durchgeführt wurde. Alle Runs wurden unter den gleichen EPICAL-2 Einstellungen durchgeführt.

3.2 Clustering

Wenn Teilchen auf der ALPIDE-Sensoren landen, entsteht eine Ansammlung von getroffenen Pixeln. Beim Sammeln der elektrischen Ladung in den Sensoren durch Diffusion und Drift kommt es vor, dass benachbarte Pixel einen Teil der Ladungsträger miteinander teilen. Eine Gruppe benachbarter Pixel eines Sensors, die getroffen sind, werden als Cluster bezeichnet. Ein Cluster kann auch aus einem einzigen Pixel bestehen.

Es gibt verschiedene Algorithmen zur Bestimmung der Cluster. Der Standardalgorithmus basiert auf geometrischer Erkennung und wurde vom DBSCAN-Algorithmus übernommen [13]. Bei diesem Algorithmus werden Cluster, die an zwei benachbarten Sensoren einer Lage liegen, ausgeschlossen. Der DBSCAN-Algorithmus funktioniert wie folgt: In einem ALPIDE-Sensor wird ein getroffener Pixel betrachtet und als Startpunkt gesetzt. Anschließend werden vom Startpunkt aus alle benachbarten Pixel gesucht, die ebenfalls einen Pixeltreffer aufweisen. Der Algorithmus endet erst, wenn alle benachbarten Pixel mit einem Pixeltreffer gefunden wurden. Der Algorithmus wird wiederholt, indem ein weiteres Pixel mit einem Pixeltreffer als Startpunkt festgelegt wird. Alle Pixel, die zu einem Cluster hinzugefügt wurden, werden von der weiteren Clustersuche ausgeschlossen. Wenn Cluster von einem ALPIDE-Sensor gefunden wurden, werden auch andere ALPIDE-Sensoren untersucht.

Der Clusteralgorithmus wird in der vorliegenden Arbeit bei der Ereignisselektion verwendet, die im Unterkapitel 3.7 erläutert wird.

3.3 Maskierung von Pixeln

Im EPICAL-2 Kalorimeter befinden sich ca. 25 Millionen Pixel, von denen nur etwa 99% die Funktionalitätsbedingungen erfüllen [7]. Die restlichen Pixel weisen ein anomales Verhalten auf. Es wird zwischen verrauschten und defekten Pixeln unterschieden. Diese werden mit verschiedenen Methoden identifiziert und maskiert. Die Information über die maskierten Pixel ist einer Pixelmaske gespeichert. Die Erstellung einer Pixelmaske wird im Kapitel 4 genauer erläutert.

3.4 Ausrichtung der ALPIDE-Sensoren

Bei einer Teststrahlungsmessung ist es von entscheidender Bedeutung, dass das EPICAL-2 Kalorimeter präzise ausgerichtet ist, um eine genaue Bestimmung der Position von Pixeln in jedem ALPIDE-Sensor zu ermöglichen. Zu diesem Zweck wurden kosmische Myonenspuren an der Utrecht Universität gemessen, wie in [7] beschrieben. Bei der Bestimmung der Ausrichtung wird die Pixelmaske nicht verwendet, um eine hohe Effizienz trotz der niedrigen Myonenrate

zu gewährleisten.

Für die Ausrichtung aller ALPIDE-Sensor werden sechs Freiheitsgrade definiert: drei für die Position und drei für die Rotation. Aufgrund des Wolfram-Absorbers ist die Bewegung entlang der z Richtung eingeschränkt, sodass nur zwei Positionsparameter und ein Rotationsparameter um die z-Achse möglich sind. Alle Verschiebungen innerhalb der transversalen Ebenen werden als freie Parameter betrachtet.

Die Bestimmung der Ausrichtungparameter erfolgt durch Spurparametrisierung der kosmischen Myonenspuren. Die Ausrichtungparameter werden so variiert bis die Werte einen minimalen χ^2 -Wert liefern. Die Bestimmung der Ausrichtungparameter erfolgt in drei Phasen. Zunächst wird der Detektor in zwei Hälften entlang der z-Achse unterteilt, wobei die linke Hälfte die linken ALPIDE-Sensoren und die rechte Hälfte die rechten ALPIDE-Sensoren enthält. In der ersten Phase wird entweder die rechte oder die linke Hälfte des EPICAL-2 Kalorimeters verwendet. Nur die Myonenspuren, die eine der beiden Seiten durchqueren, werden berücksichtigt. In der zweiten Phase wird eine Hälfte fixiert, während die Ausrichtungparameter der anderen Hälfte variiert werden, indem Spuren von der fixierten Hälfte zur anderen Hälfte verfolgt werden. In der dritten Phase werden beide Hälften gleichzeitig ausgerichtet.

3.5 Inklinationskorrektur

Im letzten Unterkapitel wird die Bestimmung der Ausrichtungparameter erklärt. Allerdings muss das EPICAL-2 Kalorimeter auch mit der Inklination des Teststrahls ausgerichtet werden. Die Bestimmung der Inklinationsparameter unterscheidet sich zwischen den DESY- und SPS-Daten.

Die Bestimmung der Inklinationsparameter der DESY-Daten wird in [7] beschrieben. In der vorliegenden Arbeit wird die Pixeltrefferverteilung für jede Lage mit der folgenden Funktion parametrisiert [14]:

$$f(x, y) = \frac{A}{r} \cdot e^{B \cdot r} \quad (3.1)$$

$$r = \sqrt{C + (x - \mu_x)^2 + (y - \mu_y)^2} \quad (3.2)$$

A , B , C , μ_x und μ_y sind freie Parameter. Die Parameter μ_x und μ_y entsprechen den maximalen Werten der Funktion $f(x, y)$. Diese werden extrahiert und als Funktion der Lage aufgetragen. Die extrahierte Werte werden mit folgender Funktion parametrisiert, wie in [14] beschrieben:

$$f_{\text{Inklination}} = m \cdot (z - 0.028 \text{ mm}) \quad (3.3)$$

Daraus wird die Steigung m der Parametrisierung bestimmt. Die Werte der Steigung m für die DESY-Daten sind in [7] gezeigt.

Die Bestimmung der Inklinationsparameter für die SPS-Daten, wie in [14] beschrieben, wird im Folgenden erläutert: Zunächst werden für jede Lage die Differenzen Δx und Δy zwischen der Position des ersten Clusters und der Position der jeweiligen betrachteten Pixel in lateraler und transversaler Richtung berechnet. Anschließend werden die Δx und Δy Verteilungen mit einer Gaußschen Funktion parametrisiert:

$$f_{\text{Gaus}}(\Delta) = A + B \cdot e^{-\frac{1}{2} \left(\frac{(\Delta - \mu)}{\sigma} \right)^2} \quad (3.4)$$

A und B sind freie Parameter. Die Mittelwerte μ aus der Parametrisierungen der Verteilungen werden extrahiert und als Funktion der Lage z dargestellt. Die Mittelwerte werden mit der Funktion $f_{\text{Inklination}}$ aus Gleichung 3.3 berechnet. Die Steigung m der Funktion für die SPS-Daten ist in [14] dargestellt.

3.6 Kalibration der ALPIDE-Sensoren

Im Unterkapitel 2.1.2 wird beschrieben, dass jeder ALPIDE-Sensor einen Schwellenwert besitzt. Deshalb müssen sie so Kalibriert werden, dass sie am Ende die gleiche Detektorantwort zeigen. Für die Kalibrierung der ALPIDE-Sensoren werden kosmische Myonenspuren verwendet, die an der Universität Utrecht in den Niederlanden bestimmt wurden und hier 7 beschrieben werden.

Wenn Myonen durch den Detektor fliegen, deponieren sie die gleiche Menge an Energie in allen ALPIDE-Sensoren. Außerdem erzeugen die Myonen in allen ALPIDE-Sensoren die gleiche Anzahl an Elektronen-paaren. Deswegen wird jeder ALPIDE-Sensor mit einem Gewichtungsfaktor multipliziert, der wie folgt, berechnet wird:

$$C_{\text{chip}} = \frac{\langle \langle N_{\text{hits}} \rangle \rangle}{\langle N_{\text{hit}} \rangle} \quad (3.5)$$

$\langle N_{\text{hits}} \rangle$ beschreibt die mittlere Anzahl der Pixeltreffer und $\langle \langle N_{\text{hits}} \rangle \rangle$ den Erwartungswert der mittleren Anzahl der Pixeltreffer. Mit dem Gewichtungsfaktor C_{chip} eines ALPIDE-Sensors wird jedes Pixel im ALPIDE-Sensor kalibriert. Eine Messung ohne Kalibration sorgt dafür, dass ALPIDE-Sensoren mit einem niedrigeren Schwellenwert eine höhere Detektorantwort liefern. Die Detektorantwort wird im Unterkapitel 4.6 erläutert.

3.7 Ereignisselektion

Für die saubere Datenaufnahme muss sichergestellt werden, dass die Kalorimeter Performance, die im Kapitel 4 genauer betrachtet wird, aufgrund der hohen Dichte des DESY-Teststrahls, nicht von mehrfachen Elektronen beeinflusst werden, die gleichzeitig auf das EPICAL-2 Kalorimeter treffen. Bei den SPS-Teststrahlen muss außerdem beachtet werden, dass die Kalorimeter Performance nicht von mehrfachen Hadronenereignissen beeinflusst wird. Da der eingebaute Trigger solche Ereignisse nicht erkennen kann, werden verschiedene Selektionsalgorithmen verwendet, die die Ereignisselektion einzelner Elektronen ermöglichen, und in den folgenden zwei Abschnitten genauer beschrieben. Im ersten Abschnitt wird die Selektion des DESY-Teststrahls und der zweite Abschnitt des CERN-SPS Teststrahls beschrieben.

3.7.1 DESY-Daten

Im EPICAL-2 Kalorimeter werden aufgrund der hohen Teststrahlraten einzelne Elektronenereignisse betrachtet. Dafür werden Elektronenereignisse selektiert, bei denen es sich nur ein Cluster an der Lage Null gebildet hat. Zusätzlich werden noch Elektronenereignisse selektiert, bei dem das Elektron innerhalb von einer $16 \times 16 \text{ mm}^2$ im Zentrum des aktiven Materials an der Lage Null betreten haben, um sichergestellt zu werden, dass die elektromagnetische Schauer aus diesen Teilchen innerhalb des EPICAL-2 Kalorimeters liegt.

Für die Auswahl einzelner Ereignisse in den DESY Daten wird außerdem ein Anti- k_t Jetalgorithmus verwendet. Mehr Informationen zu den Anti- k_t Jetalgorithmen gibt es hier [16]. Die Übertragung der Jetalgorithmen auf das EPICAL-2 Kalorimeter kann über einen Clusteralgorithmus erfolgen, der ähnliche Parameter wie der Jetalgorithmus verwendet. Das EPICAL-2 Kalorimeter wird in der transversale Richtung in Zellen c mit der Größe von $0.5 \times 0.5 \text{ mm}^2$ im Zentrum des EPICAL-2 Kalorimeters und in Zellen mit der Größe $1 \times 1 \text{ mm}^2$ um das Zentrum unterteilt. Die Zellen, die Cluster aus mindestens drei verschiedenen Lagen enthalten, sind in Zusammenhang mit den Parametern eines Pseudojets wie folgt verbunden:

$$N_{clus}^c \rightarrow p_T^i \text{ (Transversalimpuls)} \quad (3.6)$$

$$x^c \rightarrow y^i \text{ (Rapidität)} \quad (3.7)$$

$$y^c \rightarrow \phi^i \text{ (Azimutaler Winkel)} \quad (3.8)$$

N_{clus}^c ist die Anzahl der Cluster und x^c, y^c die transversale Positionen einer gegebenen Zelle c . Um zu vermeiden, dass sich zwei Jets überlappen, werden folgende Kriterien verwendet: Nur Cluster, die in den ersten zwei Lagen innerhalb von 1 mm Abstand von der Jet-Achse entfernt sind, werden selektiert. Außerdem sollen alle Cluster in den ersten zwei Lagen einen Abstand

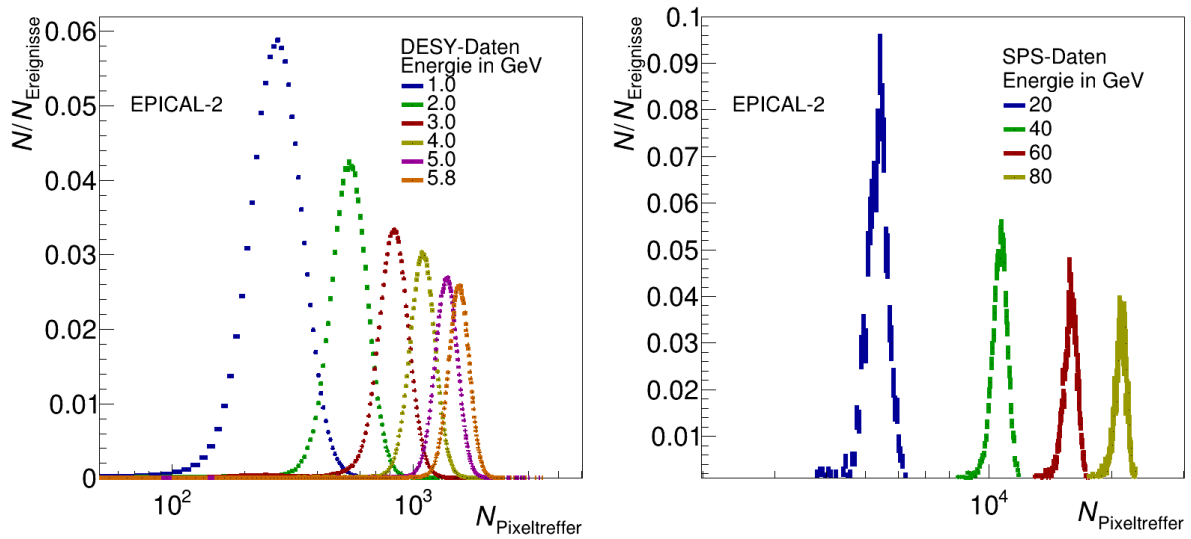


Abbildung 3.1: Pixeltrefferverteilungen integriert über alle Lagen nach der Ereigniseselektion für DESY- (links) und SPS-Daten (rechts).

von 0.5 mm zueinander haben. Zuletzt muss mindestens ein Cluster in der ersten Lage zum Jet gehören.

Abbildung 3.1 (links) zeigt die Pixeltrefferverteilung für die verschiedenen in DESY gemessenen Energien normiert auf die gesamte Anzahl der Ereignisse nach Anwendung der Ereigniseselektion. Mit höherer Energie verschiebt sich die Verteilung nach rechts.

3.7.2 SPS-Daten

Im Unterkapitel 2.2 wurde erklärt, dass der Teststrahl am CERN-SPS aus einer Mischung von Elektronen, Myonen und Hadronen besteht. In der vorliegenden Arbeit verwendet das EPICAL-2 Kalorimeter nur Elektronen. Deshalb müssen Ereignisse mit Myonen und Hadronen aussortiert werden. Die elektromagnetische Schauer von Myonen und Hadronen unterscheidet sich von der elektromagnetischen Schauer der Elektronen. Myonen und Hadronen fangen bei tieferen Lagen an, zu schauern. Auch hier werden Ereignisse einzelner Elektronen selektiert, die innerhalb des aktiven Materials getroffen sind. Ereignisse mit 0 oder mehrfachen Clusterbildungen in der Lage werden in der vorliegenden Arbeit abgelehnt.

Die Pixeltrefferverteilung eines Ereignisses wird mit einer Gaußschen Funktion parametrisiert und anschließend werden nur Ereignisse selektiert, die innerhalb von einem 5σ Bereich um den Mittelwert μ der Verteilung liegen. Abbildung 3.1 (rechts) zeigt das Ergebnis einer Pixeltrefferverteilung integriert über alle Lage für verschiedene Energien und normiert auf die Anzahl der Ereignisse nach Anwendung der Ereigniseselektion für SPS-Daten. Die Verteilung verschiebt

sich mit höherer Energie nach rechts.

Kapitel 4

Datenanalyse

In Kapitel 3 wurde erwähnt, dass die Quantifizierten der Pixel im ALPIDE-Sensor den Funktionsanforderungen entspricht. Allerdings weisen einige Pixel ein anomales Verhalten auf. Diese Pixel werden mithilfe einer erstellten Pixelmaske maskiert. Dieses Kapitel ist in zwei Teilen unterteilt.

Im ersten Teil des Kapitels werden Methoden zur Erstellung der Pixelmaske vorgestellt. Zuerst wird die Chip-Classification Methode beschrieben. Anschließend wird eine Methode erklärt, die eine Messung ohne Teststrahl verwendet, und zum Schluss eine Methode, die einen Teststrahl verwendet. Schließlich werden Randeffekte der ALPIDE-Sensoren diskutiert und die Pixelmaske präsentiert.

Im zweiten Teil dieses Kapitels wird der Einfluss weiterer Maskierung von Pixeln bzw. Spalten auf die EPICAL-2 Kalorimeter Performance untersucht, weil im Laufe der Zeit vorkommen kann, dass weitere Pixel bzw. Spalten nicht mehr funktionieren. Zunächst wird die EPICAL-2 Kalorimeter Performance vorgestellt, wie sie bereits in [14] dokumentiert wurde, welche die Grundlage für die Analyse dieser Studie bildet. Anschließend werden Ergebnisse verschiedener Pixelmaskierungen präsentiert.

4.1 Identifizierung fehlerhafter Pixel mit der Chip-Classification Methode

Die Identifikation mit der Chip-Classification Methode wurde von der ALICE ITS Kollaboration am CERN vorgestellt und liefert einen Massentest der ALPIDE-Sensoren [12]. Der Massentest beinhaltet eine Menge an funktionalen Tests, um sicherzustellen, dass die ALPIDE-Sensoren gemäß den Spezifikationen funktionieren. Mithilfe der Methode können verrauschte bzw. defekte Pixel nachgewiesen werden. Der Vorteil dieser Methode ist, dass man keinen Teststrahl braucht.

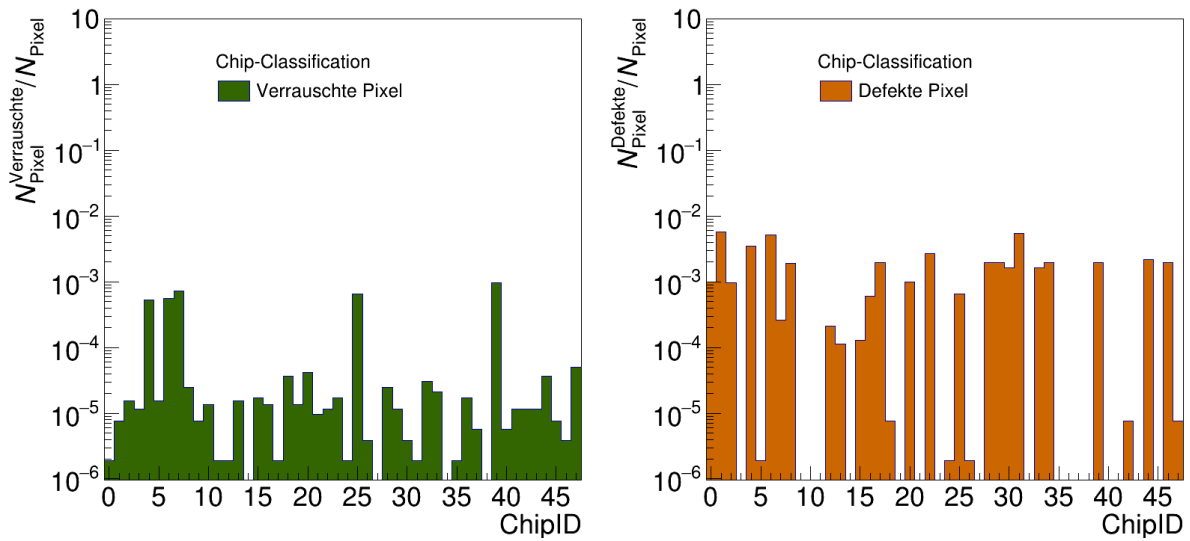


Abbildung 4.1: Rauschende Pixel (links) und defekte Pixel (rechts) identifiziert mit der Chip-Classification Methode.

Einer der Massentests ist ein analoger Scan unter Verwendung der internen Funktionalität des ALPIDE-Sensors. Hier wird ein Signal über die periphere Elektronik in einer Zeile des ALPIDE-Sensors injiziert, während alle Pixel unmaskiert sind. Das Signal ist so stark, dass es über dem Schwellenwert der ALPIDE-Sensoren liegt. Anschließend wird die Pixelmatrix ausgelesen und Information über alle fehlerhaften Pixel liefern. Dieser Vorgang wird auch für die restlichen Zeilen durchgeführt. Nach diesem Test können die Pixel als defekt oder verrauscht identifiziert werden. Verrauschte Pixel reagieren, obwohl kein Signal injiziert wurde und defekte Pixel reagieren nicht, obwohl man ein Signal in den ALPIDE-Sensor eingespeist hat.

Abbildung 4.1 (links) zeigt die Anzahl der verrauschten Pixel und Abbildung 4.1 (rechts) die Anzahl der defekten Pixel für jeden ALPIDE-Sensor. Eins der ALPIDE-Sensoren (Chip-ID 27) zeigt kein Rauschen, weil es bei der Datenaufnahme aufgrund seiner fehlerhaften Ausleseprobleme nicht betrachtet wurde. Die Anzahl der defekten bzw. verrauschten Pixel ist verglichen mit der gesamten Anzahl der Pixel in jedem ALPIDE-Sensor relativ gering.

4.2 Identifizierung fehlerhafter Pixel mit einer Messung mit Teststrahl

Wenn bei einer Messung mit einem Teststrahl Signal in einem Pixel registriert wird, ist es nicht sicher, ob es sich um Rauschen handelt. Ein Pixel hingegen, in dem kein Signal registriert wird, heißt es nicht, dass es defekt ist. In diesem Unterkapitel werden zwei Methoden zum Nachweis von defekten und verrauschten Pixeln vorgestellt. Die präsentierten Abbildungen wurden unter

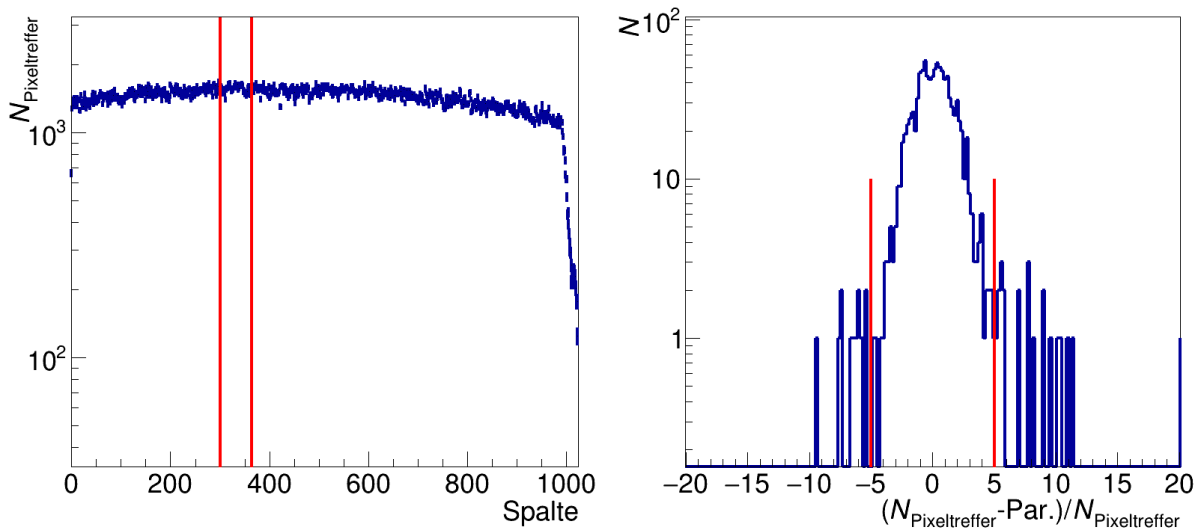


Abbildung 4.2: Projektion der Pixeltrefferverteilung auf die Spaltenachse (links) und relative Abweichung der benachbarten Spalten (rechts).

Verwendung von SPS-Teststrahlen erstellt.

Defekte Pixel

Ziel dieser Methode ist es, die defekten Pixel zu identifizieren. Während der Messung kann es aufgrund von Zufallsprozessen vorkommen, dass einige Pixel nicht erfasst werden. Daher können sie nicht von den tatsächlichen defekten Pixeln unterschieden werden. Die Methode schließt ganze Pixelstreifen aus, wenn die Mehrheit der Pixel im Mittelwert von den benachbarten Streifen abweicht. Dazu wird zunächst die Pixeltrefferverteilung auf die Spaltenachse projiziert, indem die Anzahl der Pixeltreffer in dieser Spalte gezählt wird. Als Nächstes wird in einem Abstand von 64 Spalten (also 32 Spalten rechts und 32 Spalten links) um die zu untersuchende Spalten herum der Bereich linear parametrisiert. Für jede Spalte werden also die Anzahl der Pixeltreffer und der erwartete Wert von der Parametrisierung ermittelt. Daraus wird die relative Abweichung zwischen den beiden Werten ermittelt und der Vorgang wird wiederholt, indem der Spaltenbereich um eine Spalte verschoben wird. Abbildung 4.2 (links) zeigt eine Projektion einer Pixeltrefferverteilung auf die Spaltenachse und Abbildung 4.2 (rechts) zeigt das Ergebnis der relativen Abweichung. Spalten, die eine relative Abweichung außerhalb von 5, werden als defekt identifiziert und in die Pixelmaske übernommen. Abbildung 4.3 zeigt die Anzahl der defekten Pixel in jeder Chip-ID.

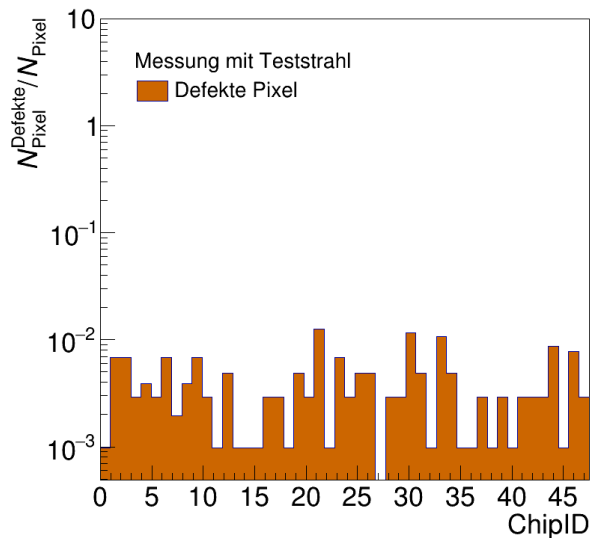


Abbildung 4.3: Anzahl der defekten Pixel (rechts) identifiziert unter Verwendung eines SPS-Teststrahles.

Verrauschte Pixel

Um verrauschte Pixel in der Pixeltrefferverteilung zu identifizieren, ist es wichtig zu beachten, dass einige Pixel sowohl Pixeltreffer als auch Rauschen zeigen können. Um sie voneinander zu unterscheiden, erfolgt die Analyse lokal. Dabei wird eine Region von 32×32 Pixeln betrachtet, in der der Mittelwert und die Standardabweichung der Anzahl der Pixeltreffer berechnet werden. Eine signifikante Abweichung deutet auf Rauschen hin. Abbildung 4.4 (links) zeigt die Pixeltrefferverteilung für einen ALPIDE-Sensor, während Abbildung 4.4 (rechts) die Abweichung aller Pixel vom Mittelwert in der entsprechenden Region in einem ALPIDE-Sensor zeigt. Es ist deutlich erkennbar, dass ab einer Abweichung von 8 die Verteilung sich verändert. Deshalb wird als Schwellenwert 8 festgelegt. Pixel mit einer Abweichung über 8 werden herausgefiltert und in die Pixelmaske übernommen. Abbildung 4.5 zeigt die Anzahl der verrauschten Pixel für jedes Chip-ID.

4.3 Identifizierung fehlerhafter Pixel mit einer Messung ohne Teststrahl

Ziel einer Messung bei Abwesenheit eines Teststrahles ist die Bestimmung von verrauschten Pixeln. Bei dieser Methode wird das EPICAL-2 Kalorimeter eingeschaltet und Messungen durchgeführt. Die Messungen wurden zwischen Messungen mit Teststrahl in unterschiedlichen Zeitintervallen durchgeführt. Auch hier wird die Maskierung der Pixel bei der Messung deaktiviert. Dadurch, dass die Anzahl der Ereignisse insgesamt viel größer ist als die gemessene Pixeltref-

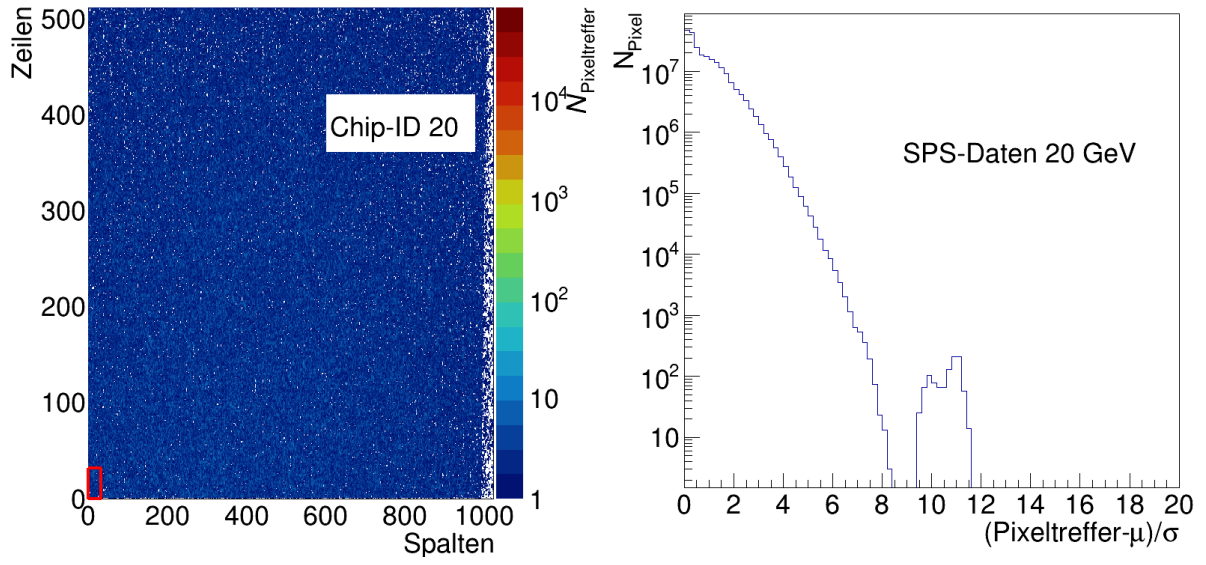


Abbildung 4.4: Pixeltrefferverteilung mit einer 32×32 Pixelregion für den ALPIDE-Sensor mit der Chip-Id 20 (links) und die Abweichung der Pixeltreffer vom Mittelwert in der jeweiligen Region (rechts).

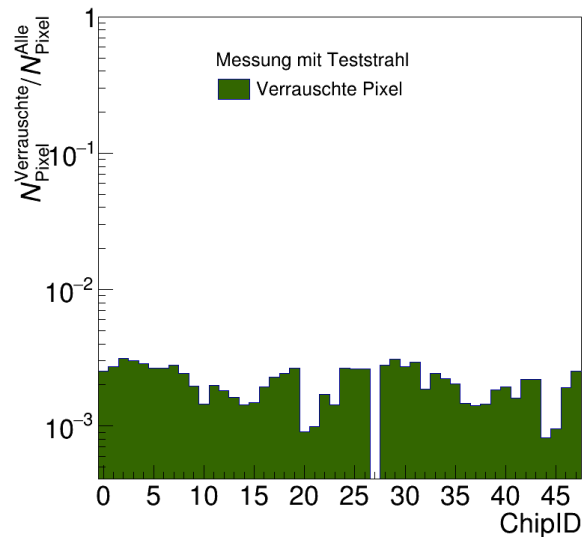


Abbildung 4.5: Anzahl der verrauschten Pixel identifiziert unter Verwendung eines SPS-Teststrahles.

ferrate, lässt sich die Wahrscheinlichkeitsfunktion der Anzahl der Treffer pro Pixel, beschrieben mit einem Mittelwert λ , durch eine Poisson-Verteilung beschreiben:

$$f(k, \lambda) = \frac{\lambda^k \cdot e^{-\lambda}}{k!} \quad (4.1)$$

Wenn die Wahrscheinlichkeitsfunktion der Anzahl der Treffer je Pixel mit einer Poisson-Verteilung mit dem gleichen Mittelwert beschrieben werden kann, dann wird die Verteilung durch statistisches Rauschen verursacht und müssen die Pixel nicht als fehlerhaft erwiesen. Andernfalls funktionieren die Pixel nicht richtig und es wird eine Maske benötigt. Abbildung 4.6 (links) zeigt die Wahrscheinlichkeitsfunktion der Pixeltreffer im EPICAL-2 Kalorimeter in Abhängigkeit von der Anzahl der Pixel. Beide Verteilungen fallen ab einer bestimmten Anzahl an Pixeltreffer abrupt ab. Ab einer bestimmten Anzahl an Pixeltreffer kann die Poisson-Verteilung die Pixeltrefferverteilung nicht gut beschreiben.

Abbildung 4.7 (links) zeigt die Anzahl der Pixel als Funktion der mittleren Pixeltreffer normiert auf die Anzahl der Ereignisse. Die Mehrheit der Pixel besitzen eine mittlere Anzahl an Pixeltreffer pro Ereignis unterhalb von 10^{-3} . Wenn ein Pixel Signal in mehr als Tausend Ereignisse erzeugt hat, dann wird das Pixel als verrauscht erwiesen und wird in der Pixelmaske hinzugefügt.

Abbildung 4.7 (rechts) zeigt die Anzahl der verrauschten Pixel für jeden ALPIDE-Sensor. Der ALPIDE-Sensor mit der Chip-ID 27 zeigt kein Rauschen, weil es bei der Messung deaktiviert wurde. Nach dieser Methode zeigt der ALPIDE-Sensor mit der Chip-ID 47 das meiste Rauschen.

4.4 Randeffekte im ALPIDE-Sensor

In Unterkapitel 2.1.1 wurde beschrieben, dass im ALPIDE-Sensor um die Pixelmatrix ein n-dotierter Ring existiert. Abbildung 4.8 zeigt einen Abschnitt einer Trefferverteilung eines ALPIDE-Sensors als Abhängigkeit der Zeilen. Am Rand des ALPIDE-Sensors ist die Trefferanzahl signifikant niedrig. Der n-dotierte Ring sorgt dafür, dass die Mehrheit der elektrischen Ladung von ihm herangezogen wird. Aus diesem Grund wird dieser Bereich entfernt und in die Pixelmaske importiert. Genauer gesagt, man nimmt für die Pixelmaske nur die erste Reihe bzw. Spalte auf jeder Seite des ALPIDE-Sensors. Das heißt, dass insgesamt 3068 Pixel in jedem ALPIDE-Sensor maskiert werden.

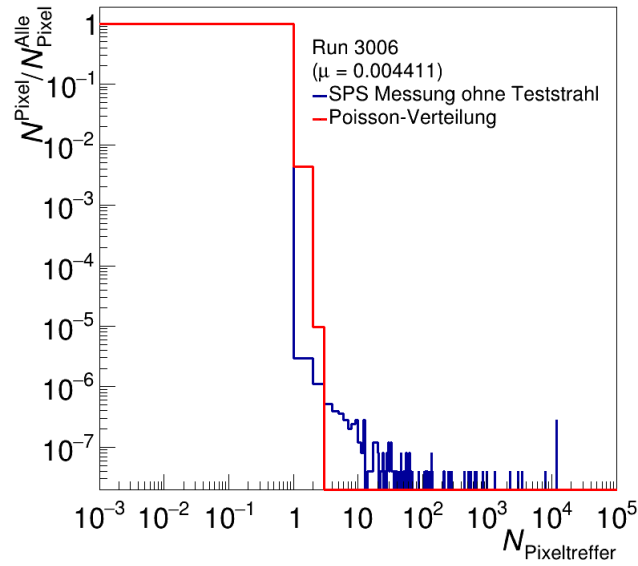


Abbildung 4.6: Wahrscheinlichkeitsfunktion der Anzahl der Treffer je Pixel verglichen mit einer Poisson-Verteilung mit dem gleichen Mittelwert.

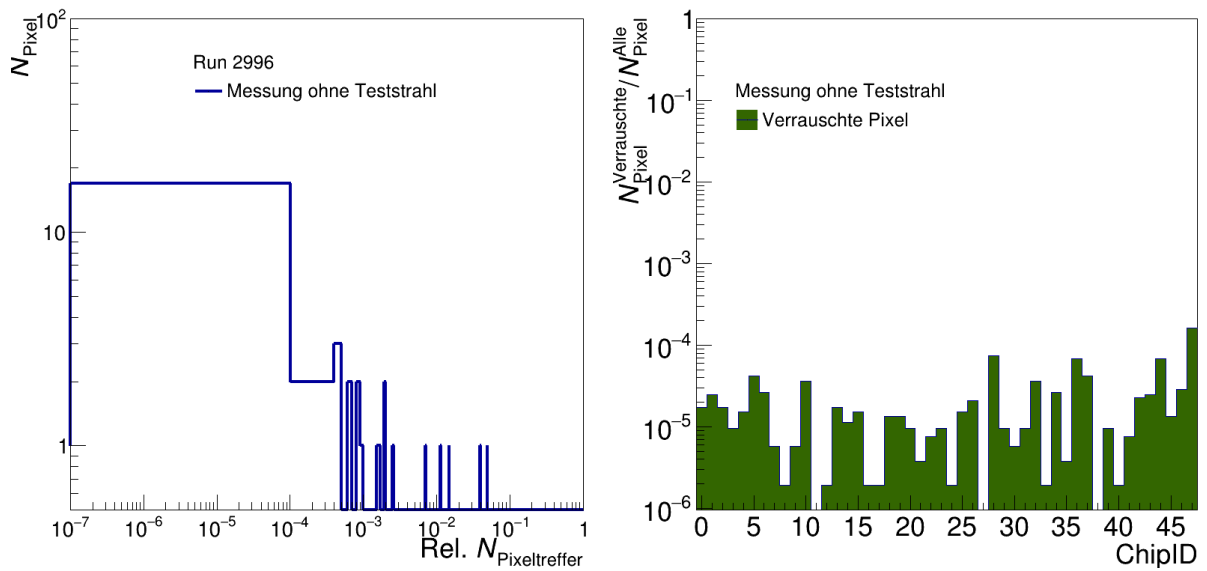


Abbildung 4.7: Anzahl der Pixel als Funktion der mittleren Anzahl der Pixeltreffer normiert auf die Anzahl der Ereignisse (links) und Anzahl der verrauschten Pixel aus einer Messung ohne Teststrahl (rechts).

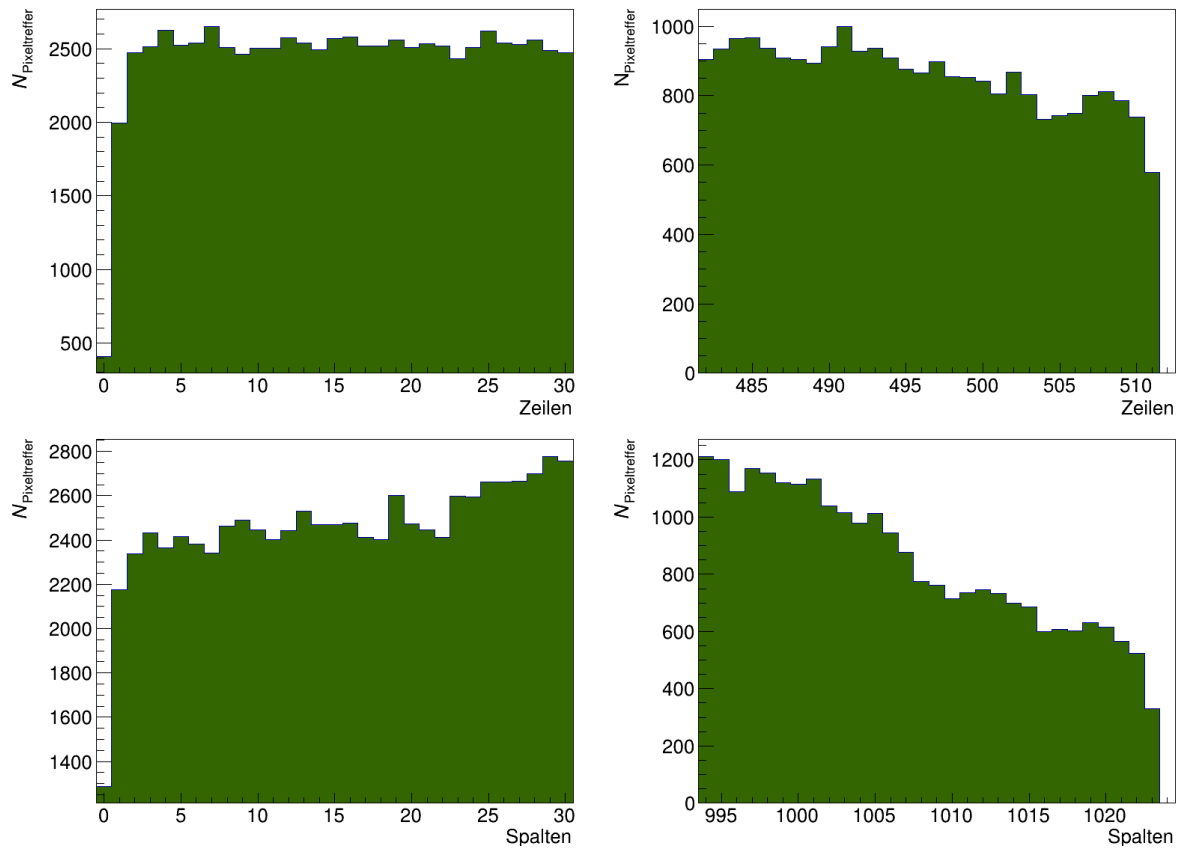


Abbildung 4.8: Projektion der Pixeltrefferverteilung auf die Zeilen (oben) bzw. auf die Spalten (unten) für den ALPIDE-Sensor mit der Chip-ID 16.

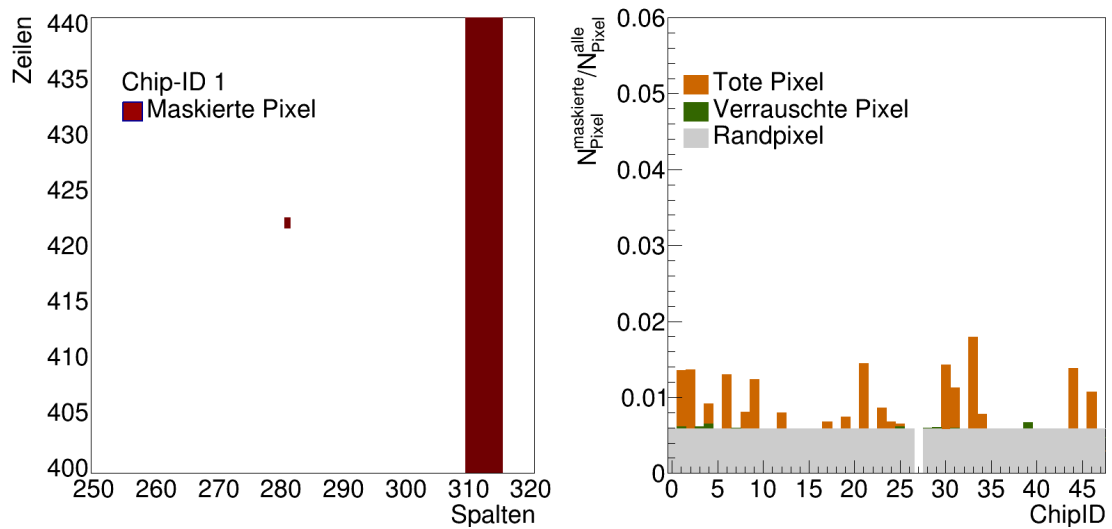


Abbildung 4.9: Pixelmaske für den ALPIDE-Sensor mit der Chip-ID 1 (links) und der Anteil der maskierten Pixel in jedem ALPIDE-Sensor (rechts).

4.5 Pixelmaske

Für die Erstellung der Pixelmaske werden alle Ergebnisse aus den vorherigen Abschnitten dieses Kapitels zusammengeführt. Abbildung 4.9 zeigt einen Ausschnitt der erstellten Pixelmaske für den ALPIDE-Sensor mit der Chip-ID 1. Die Pixelmasken für die übrigen ALPIDE-Sensoren sind im Anhang zu finden. In der Abbildung 4.9 (links) sind ein maskierter Spaltenbereich sowie ein maskiertes Pixel zu sehen. Abbildung 4.9 (rechts) zeigt den Anteil der maskierten Pixel in jedem ALPIDE-Sensor als tot, verrauscht oder als Randpixel. Die maskierten Pixel machen 1-2 % aller Pixel aus. In den folgenden Kapiteln wird diese Pixelmaske als „Standardpixelmaske“ bezeichnet.

4.6 Kalorimeter Performance des EPICAL-2 Kalorimeters

In diesem Unterkapitel wird die Performance des EPICAL-2 Kalorimeters, also die Detektorantwort und die Energieauflösung, eingeführt.

In dieser Arbeit ist die Detektorantwort μ wie folgt definiert:

$$\mu = \frac{1}{N_{\text{events}}} \sum_{i=1}^{N_{\text{events}}} N_{\text{hits}}^i \quad (4.2)$$

N_{hits}^i ist die gesamte Anzahl der Pixeltreffer für ein einzelnes Event und N_{events} die gesamte Anzahl der Ereignisse.

Abbildung 4.10 (links) zeigt die Detektorantwort μ als Funktion der Energie E für Messungen von Elektronen aus einem Teststrahl. Die in dieser Abbildung dargestellten Messwerte wurden bereits in [14] veröffentlicht. Es ist näherungsweise ein linearer Zusammenhang zwischen der mittleren Anzahl der Pixeltreffer und der Energie zu sehen. Daher wird folgende lineare Funktion für die Parametrisierung der Detektorantwort in Abhängigkeit von der Energie verwendet:

$$f(E) = a * E \quad (4.3)$$

a ist ein freier Parameter. Da unter der Annahme, dass alle verrauschten Pixel maskiert wurden, bei $E = 0$ eine Detektorantwort von $\mu = 0$ zu erwarten ist, wird für die Parametrisierung eine Funktion verwendet, die die y-Achse bei $E = 0$ schneidet.

Die Energieauflösung σ/μ bezeichnet das Verhältnis der Standardabweichung σ der Detektorantwort und der Detektorantwort μ . Abbildung 4.10 (rechts) zeigt die Energieauflösung in Abhängigkeit von der Energie E für Messungen von Elektronen aus einem Teststrahl. Die Energieauflösung verbessert sich mit steigender Energie. Die Energieauflösung wird, wie in Kapitel

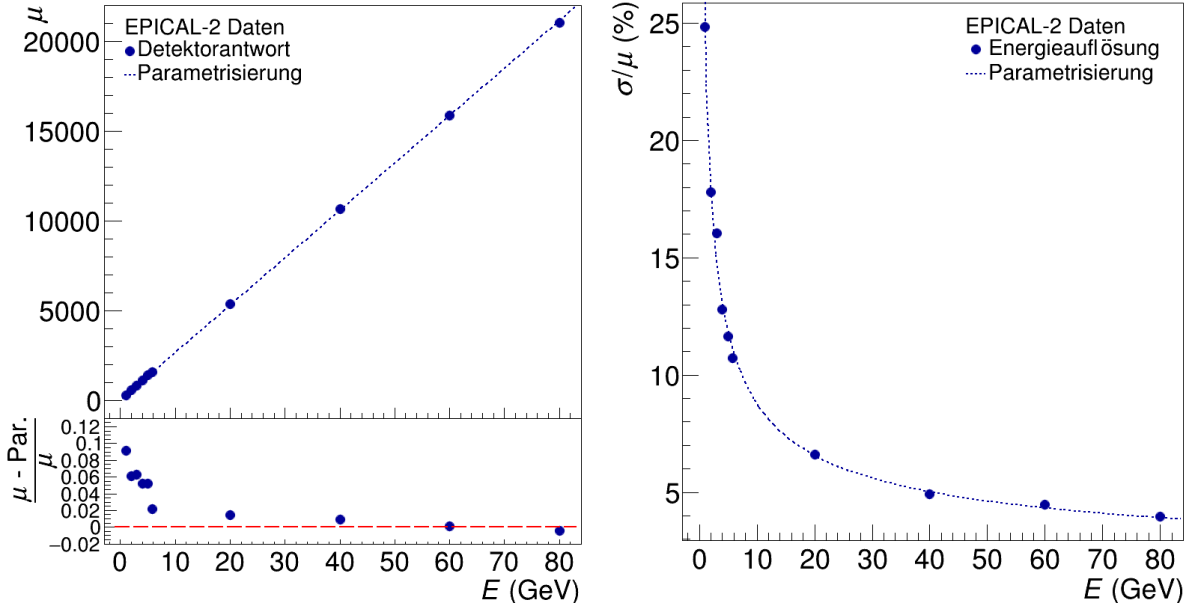


Abbildung 4.10: Detektorantwort (links) und Energieauflösung (rechts) in Abhängigkeit von der Energie für Messung von Elektronen aus einem Teststrahl.

1.2 beschrieben, mit folgender Funktion parametrisiert:

$$f(E) = \frac{a}{\sqrt{E}} \oplus \frac{b}{E} \oplus c \quad (4.4)$$

a, b und c sind freie Parameter.

In den folgenden Unterkapiteln wird die Kalorimeter Performance mit der Standardpixelmaske mit der Kalorimeter Performance mit simulierten Pixelmasken verglichen. Dabei stellen die Detektorantwort und die Energieauflösung wichtige Vergleichsparameter dar.

4.7 Einfluss zufälliger Pixelmaskierungen auf die Kalorimeter Performance

In Kapitel 4 wurde gezeigt, dass die Standardpixelmaske Informationen über die fehlerhaften Pixel und Spalten enthält. Um den Einfluss weiterer maskierter Pixel und Spalten auf die Performance des EPICAL-2 Kalorimeters zu untersuchen, werden simulierte Pixelmasken verwendet, die zusätzlich zu den in der Standardpixelmaske maskierten Pixeln weitere zufällig maskierte Pixel enthalten. Für die Erstellung der simulierten Pixelmasken werden zu den mit der Standardpixelmaske maskierten Pixeln und Spalten zufällig weitere hinzugefügt, bis ein bestimmter Anteil ϕ der Pixel oder Spalten in jedem ALPIDE-Sensor maskiert ist. Insgesamt setzt sich ϕ wie folgt zusammen:

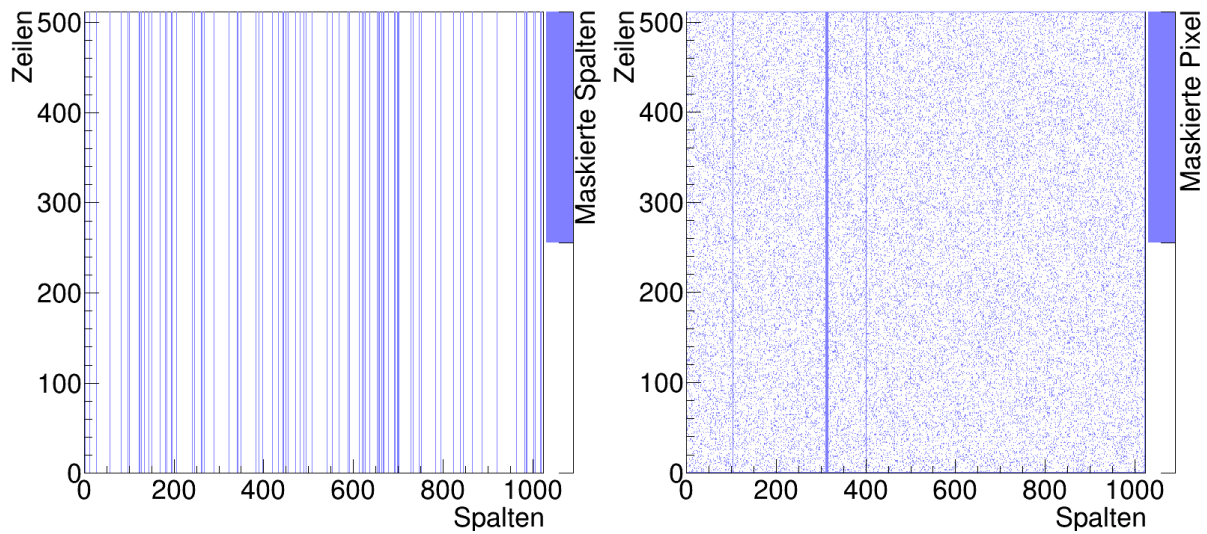


Abbildung 4.11: Simulierte Pixelmaske für Spalten (links) und Pixel (rechts), bei der 10 % Spalten bzw. Pixel maskiert wurden.

$$\phi = \phi_{\text{Standardpixelmaske}} + \phi_{\text{Simuliert}} \quad (4.5)$$

$\phi_{\text{Standardpixelmaske}}$ ist der Anteil der maskierten Pixel und Spalten aus der Standardpixelmaske und $\phi_{\text{Simuliert}}$ der Anteil der Pixel und Spalten, der zufällig hinzugefügt wird. Bei der Erstellung der simulierten Pixelmaske wird sichergestellt, dass sich die zufällig maskierte Pixel und Spalten nicht überlappen.

Abbildung 4.11 zeigt zwei simulierte Pixelmasken für eine zufällige Maskierung von Spalten (links) und Pixeln (rechts) für $\phi = 10\%$. In Abbildung 4.11 (rechts) sind neben maskierten Pixeln auch ganze maskierte Spalten zu erkennen. Diese resultieren von der Standardpixelmaske, die als Grundlage für alle simulierten Pixelmasken dient.

Da die Standardpixelmaske einen Anteil von $\phi_{\text{Standardpixelmaske}} = 1 - 2\%$ der Pixel in jedem ALPIDE-Sensor als fehlerhaft ausweist, wird dieser Anteil in der simulierten Pixelmaske durch zusätzliche zufällig maskierte Pixel erhöht. In den Simulationen werden Anteile von $\phi = 5, 10, 15, 20, 30, 40, 50$ und 60% maskierten Pixeln bzw. Spalten in jedem ALPIDE-Sensor betrachtet. Diese zusätzliche Maskierung führt zu einer Reduktion der Detektorantwort μ der Pixeltreffer, da die maskierten Pixel bei der Auswertung nicht berücksichtigt werden.

Abbildung 5.3 (links) zeigt die Detektorantwort in Abhängigkeit von der Energie für Messung von Elektronen aus einem Teststrahl unter Verwendung der Standardpixelmaske sowie simulierter Pixelmasken mit verschiedenen Anteilen maskierter Pixel. Mit steigendem Maskierungsanteil verringert sich die Detektorantwort. Der Anteil der Maskierung hat keinen signifikanten Einfluss auf den linearen Zusammenhang zwischen Detektorantwort und Energie.

Abbildung 4.12 (rechts) zeigt die Energieauflösung in Abhängigkeit von der Energie für Mes-

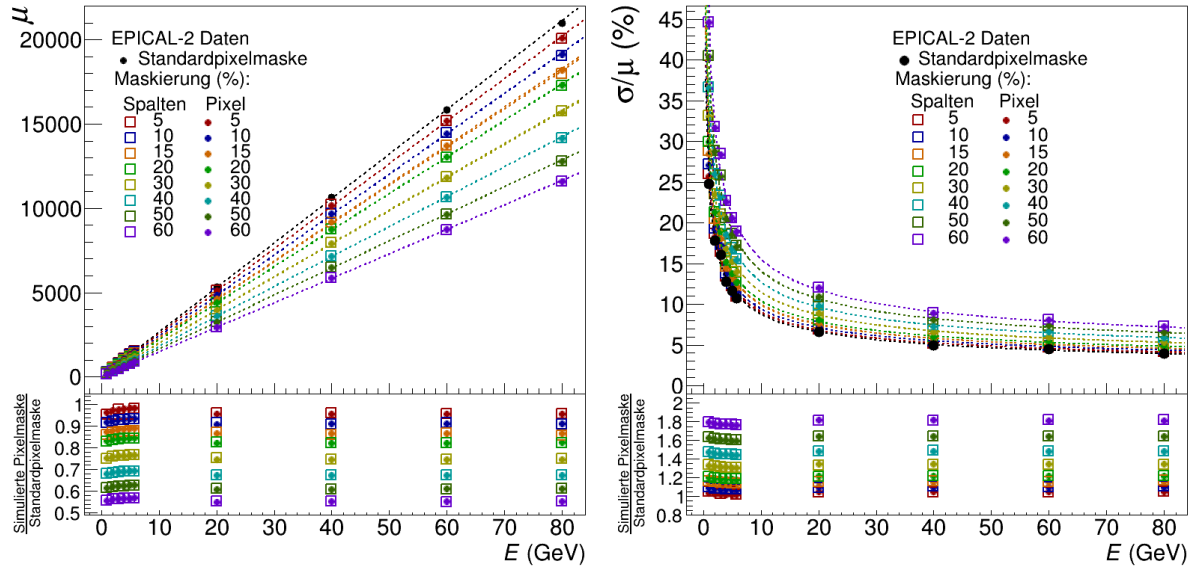


Abbildung 4.12: Detektorantwort (links) und Energieauflösung (rechts) in Abhängigkeit von der Energie für verschiedene Anteile ϕ an maskierten Pixel oder Spalten.

sung von Elektronen aus einem Teststrahl unter Verwendung der Standardpixelmaske sowie simulierter Pixelmasken mit verschiedenen Anteilen maskierter Pixel. Die Energieauflösung verschlechtert sich mit zunehmendem Anteil maskierter Pixel und Spalten. Die Energieauflösung für die Maskierung von Spalten und Pixeln bei gleichem Maskierungsanteil ist gleich im Rahmen der statistischen Unsicherheiten. Es folgt, dass die Gesamtanzahl der maskierten Pixel einen Einfluss auf die Energieauflösung hat.

4.8 Einfluss von Maskierungen im Bereich zwischen den ALPIDE-Sensoren auf die Kalorimeter Performance

In Kapitel 2 wird beschrieben, dass zwischen den ALPIDE-Sensoren einer Lage eine Lücke von ca. 100 μm existiert. In diesem Unterkapitel wird der Einfluss von maskierten Pixeln um den Bereich zwischen zwei ALPIDE-Sensoren einer Lage untersucht. Dazu werden Zeilen am Rand des jeweiligen ALPIDE-Sensors symmetrisch um die Lücke maskiert, d.h., es wird die gleiche Anzahl an Zeilen im linken und im rechten ALPIDE-Sensor maskiert, um den Einfluss der Lücke zu analysieren. Die Ergebnisse der Detektorantwort und der Energieauflösung sind in den Abbildungen 4.13 zu sehen.

Abbildung 4.13 (links) zeigt die Detektorantwort in Abhängigkeit von der Energie bei verschiedenen Maskierungen von Zeilen, die die ALPIDE-Sensoren angrenzen. Außerdem ist das Verhältnis der verschiedenen Maskierungen mit der Standardpixelmaske gezeigt. Die Maskierung um die Lücke zeigt keinen starken Einfluss auf den linearen Zusammenhang zwischen

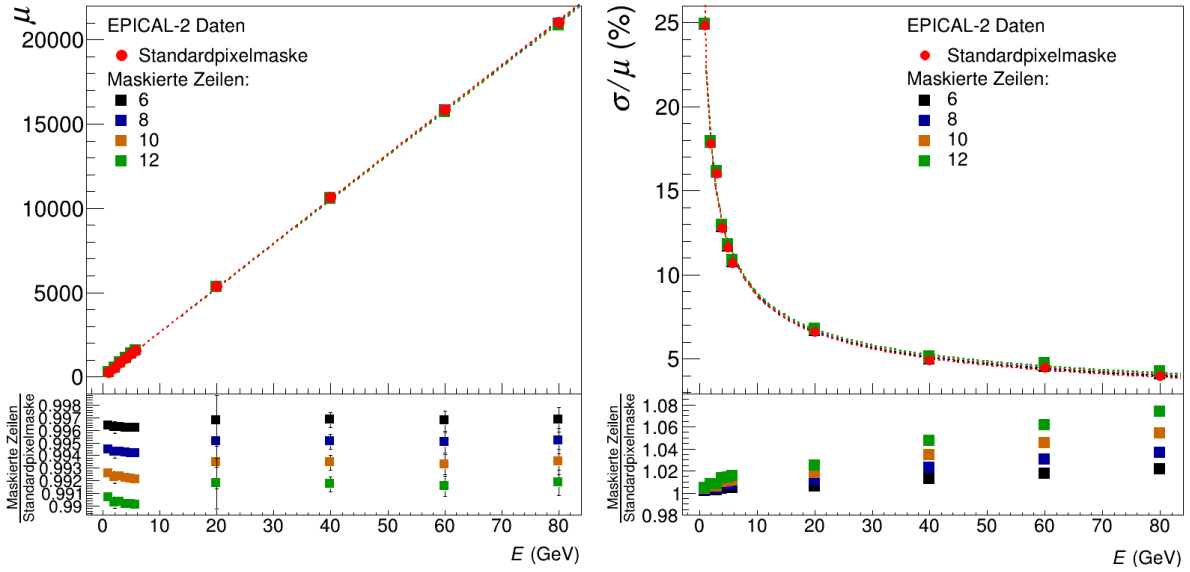


Abbildung 4.13: Detektorantwort (links) und Energieauflösung (rechts) in Abhängigkeit von der Energie, wenn mehrere Zeilen, die an die Lücke zwischen den beiden ALPIDE-Sensoren in jeder Lage angrenzen, maskiert werden.

Detektorantwort und Energie. Wie bereits im Unterkapitel 4.7 erklärt, gibt es bei der Detektorantwort bei kleinen Energien eine geringe Abweichung um maximal 1% von der Standardpixelmaske. Darüber hinaus zeigt die Maskierung von Zeilen einen stärkeren Einfluss bei niedrigen Energien, weil die Anzahl der Pixeltreffer niedrig ist.

Abbildung 4.13 (rechts) zeigt die Energieauflösung in Abhängigkeit von der Energie bei Maskierung von Zeilen, die den ALPIDE-Sensoren angrenzen. Außerdem ist das Verhältnis der verschiedenen Maskierungen mit der Standardpixelmaske gezeigt. Die Energieauflösung verschlechtert sich bei höherer Maskierung, da der Teststrahl das Zentrum der Lage trifft und bei Zeilenmaskierung um diesen Bereich Pixeltreffer nicht betrachtet werden. Dieser Effekt verstärkt sich mit steigender Energie, was zu einer $\sim 8\%$ Verschlechterung bei $E = 80$ GeV und einer Maskierung von 12 Zeilen führt. Deshalb führt eine größere Lücke zwischen zwei ALPIDE-Sensoren in einer Lage zu einer Verschlechterung der Energieauflösung.

4.9 Einfluss der EPICAL-2 Lagen auf die Kalorimeter Performance

In den Unterkapiteln 4.7 und 4.8 wurde der Einfluss von Pixel- bzw. Spaltenmaskierung sowie von Zeilenmaskierung auf die EPICAL-2 Kalorimeter Performance untersucht. Es kann vorkommen, dass eine komplette Lage ausfällt. In diesem Unterkapitel wird dieser Fall untersucht. Zunächst wird das longitudinale Schauerprofil des EPICAL-2 Kalorimeters vorgestellt.

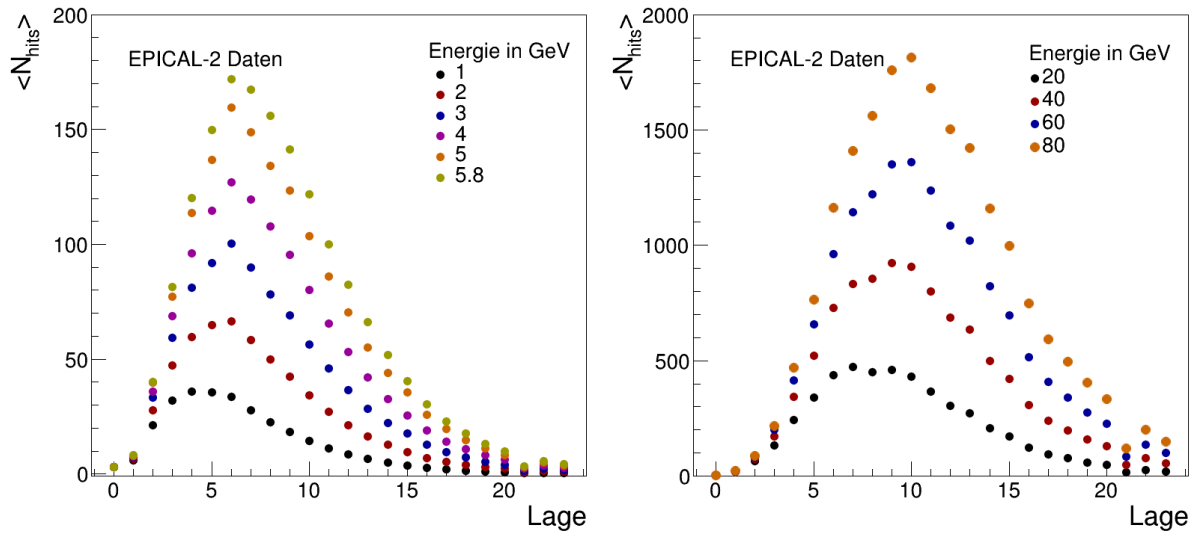


Abbildung 4.14: Longitudinale Profile für DESY- (links) und SPS-Daten (rechts) für Messung von Elektronen aus einem Teststrahl.

Anschließend wird die Energieauflösung einer einzelnen Lage des EPICAL-2 Kalorimeters gezeigt und schließlich wird der Einfluss von Maskierung einer kompletten Lage untersucht.

4.9.1 Longitudinales Profil

Das elektromagnetische Schauerprofil des EPICAL-2 Kalorimeters lässt sich mithilfe des longitudinalen Profils, nämlich die mittlere Anzahl $\langle N_{hits} \rangle$ an Pixeltreffer in Abhängigkeit von der Lage, und des lateralen Profils, nämlich die Pixeltrefferdichte in Abhängigkeit von der Lage, beschreiben. Im Rahmen dieser Arbeit wird nur auf das longitudinale Profil eingegangen.

Abbildungen 4.14 zeigen die longitudinalen Profile für alle gemessenen Energien. Die mittlere Anzahl der Pixeltreffer steigt mit höherer Energie an. Außerdem besitzt jede Verteilung einer bestimmten Energie ein Maximum, das sogenannte Schauermaximum, an dem die Anzahl der produzierten Schauerteilchen maximal ist. Das Schauermaximum verschiebt sich mit steigender Energie nach rechts und befindet sich zwischen den Lagen 5 und 10.

4.9.2 Energieauflösung einer einzelnen Lage

In diesem Abschnitt wird die Energieauflösung für jede einzelne Lage untersucht. Die Energieauflösung σ/μ wird durch die Division der Standardabweichungsverteilung in Abhängigkeit von der Lage durch das longitudinale Profil errechnet. In den Abbildungen 4.15 sind die Verteilungen der Standardabweichung σ dargestellt für die Energien $1.0 < E < 5.8$ GeV (links) und $20 < E < 80$ GeV (rechts).

Im vorherigen Unterkapitel 5.5.1 wurde beschrieben, dass es ein Schauermaximum zwischen

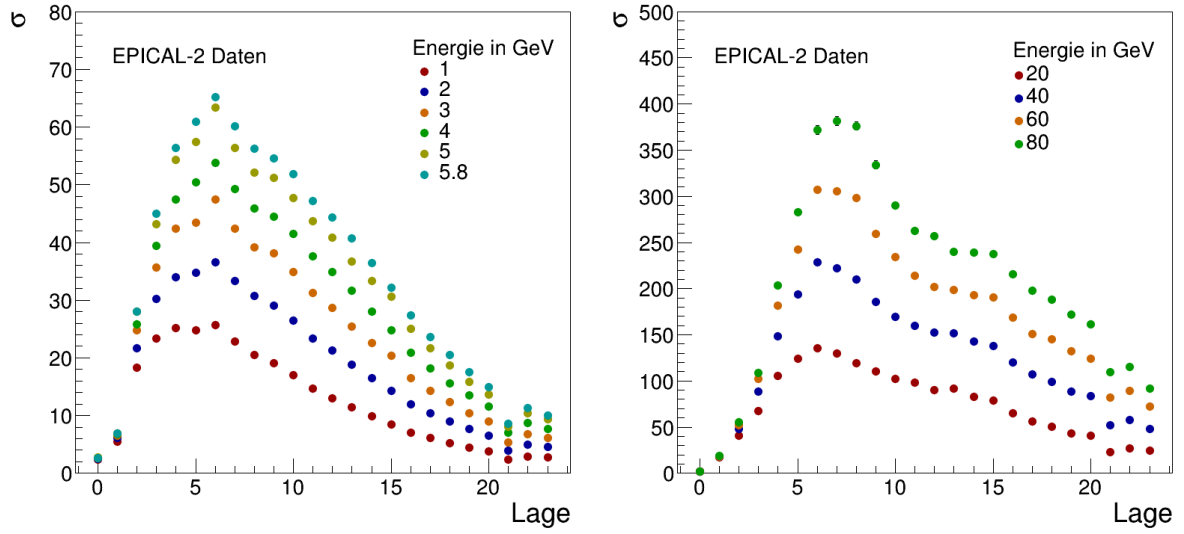


Abbildung 4.15: Standardabweichung für DESY (links) und für SPS-Daten (rechts) der Pixeltrefferverteilungen einer einzelne Lage.

der Lagen 5 und 10 gibt. Da die mittlere Anzahl an Pixeltreffer beim Schauermaximum maximal ist, ist an dieser Stelle die Energieauflösung der Pixeltreffer am besten. Abbildung 4.16 zeigt die Energieauflösung in Abhängigkeit von der Lage für Messung von Elektronen aus einem Teststrahl. Es ist ein Minimum zwischen den Lagen 5 und 10 zu beobachten, dessen Position sich mit steigender Energie nach rechts verschiebt. Es ist auch zu beachten, dass die Auflösung, nachdem das Minimum erreicht ist, schlechter wird, was auf das Verringern der Anzahl der Pixeltreffer bei tieferen Lagen zurückzuführen ist.

4.9.3 Energieauflösung bei Maskierung einer Lage

In diesem Unterkapitel wird der Einfluss von Maskierung einzelner Lagen auf die EPICAL-2 Kalorimeter Performance untersucht. Hierfür wird eine komplette Lage beim Zählen der Pixeltreffer für eine bestimmte Energie maskiert. Dabei entstehen insgesamt 24 verschiedene Pixeltrefferverteilungen für eine bestimmte Energie E , aus denen der Mittelwert $\langle N_{hits} \rangle = \mu$ und die Standardabweichung σ bestimmt werden. Die Pixeltrefferverteilungen sind im Anhang zu finden.

Abbildung 4.17 (links) zeigt das Ergebnis der Energieauflösung für die Maskierung einer Lage $(\sigma/\mu)_{\text{Maskierte Lage}}^{\text{Pixeltreffer}}$ normiert auf die Energieauflösung des EPICAL-2 Kalorimeters $(\sigma/\mu)_{\text{Pixeltreffer}}$. Bei kleinen Energien $1.0 < E < 5.8$ GeV haben die Verteilungen eine ähnliche Form zum longitudinalen Profil. Die Energieauflösung des Kalorimeters ist am schlechtesten an der Position des Schauermaximums, da dort die meisten Pixeltreffer bei der Bestimmung der Pixeltrefferverteilung maskiert werden. Das Maximum der Auflösung nimmt mit höheren Energien ab.

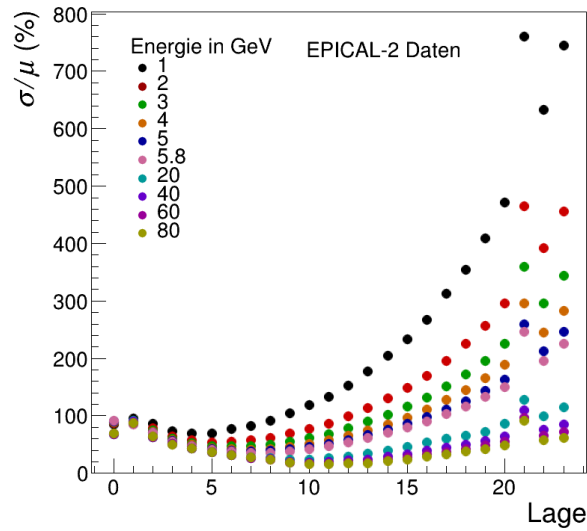


Abbildung 4.16: Energieauflösung als Funktion der Lage des EPICAL-2 Kalorimeters für Messung von Elektronen aus einem Teststrahl.

Insgesamt gibt es eine Verschlechterung um ~ 10 % bei einer Energie von 1 GeV. Die Fehlerbalken an den Datenpunkten wurden mit der Gaußschen Fehlerfortpflanzung berechnet. Bei höheren Energien $20 < E < 80$ GeV ist allerdings eine nicht erwartete Form zu beobachten. Das Maximum der Pixeltrefferverteilung ist nach rechts verschoben. Das heißt, dass die Lagen zwischen 15 und 19 den größten Einfluss auf die Performance haben. Zusätzlich gibt es bei der Lage 9 ein Minimum. Die Vermutung ist, dass bei Maskierung einer Lage die Pixeltrefferverteilungen sehr schmal sind, weil Einträge mit einer großen Anzahl an Pixeltreffer nicht in die Verteilungen eingehen. Außerdem zeigt die Lage 21, dass die Energieauflösung deutlich besser wird, da die Lage als defekt erwiesen wurde. Abgesehen von der unerwarteten Form, wird die Energieauflösung um max. 18 % schlechter bei der Energie $E = 80$ GeV.

Abbildung 4.17 (rechts) zeigt die Energieauflösung $(\sigma/\mu)_{\text{Maskierte Lage Pixeltreffer}}^{\text{Maskierte Lage Pixeltreffer}}$ normiert auf die Energieauflösung des EPICAL-2 Kalorimeters $(\sigma/\mu)_{\text{Pixeltreffer}}$ in Simulation, um die nicht erwartete Form in Daten in $20 < E < 80$ GeV besser zu verstehen. Auch hier lässt sich das nach rechts verschobene Maximum verifizieren.

Beim Vergleich der Verteilungen der Standardabweichung für die einzelnen Lagen in der Abbildung 4.15 ist eine Schwelle ab der Lage 13 zu erkennen, deren Auswirkung mit steigender Energie E stärker wird. Das heißt, dass die Pixeltrefferverteilungen in den tieferen Lagen breiter sind als vermutet, was die Energieauflösung sowohl bei Betrachtung aller tieferen Lagen als auch bei Maskierung einer kompletten Lage verschlechtert. Allerdings erklärt das nicht die Ursache der erwarteten Form.

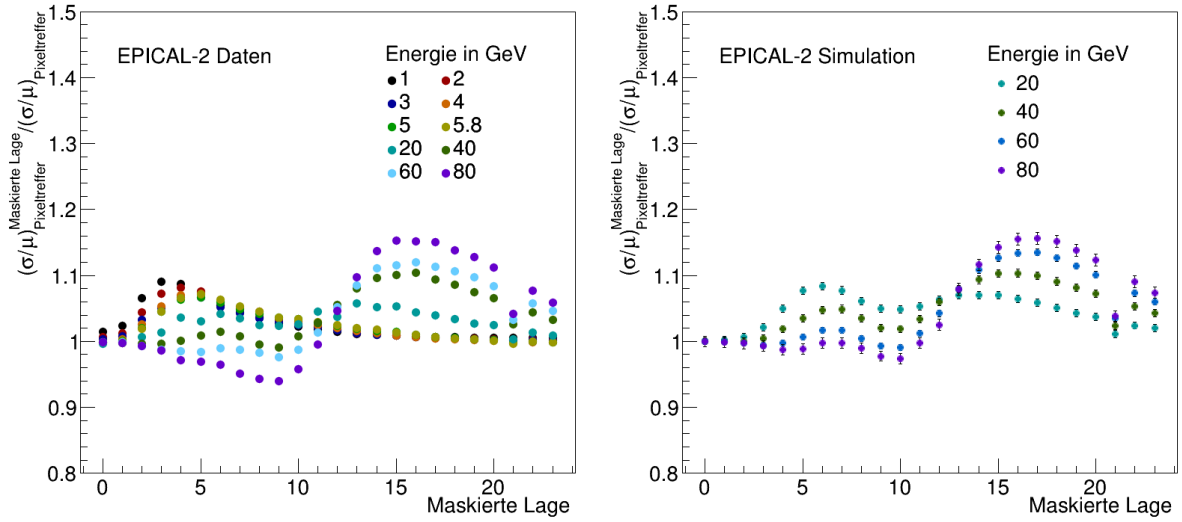


Abbildung 4.17: Energieauflösung als Abhängigkeit von dem Ausfall einer Lage für verschiedenen Energien normiert auf die Energieauflösung des kompletten EPICAL-2 Kalorimeters.

4.9.4 Myon- und Hadronenauflösung

Um eine Erklärung für die unerwartete Form der Energieauflösung bei hohen Energien aus dem vorherigen Abschnitt 4.9.3 zu finden, wird vermutet, dass Myonen und Hadronen einen Einfluss auf die Kalorimeter Performance haben könnten, da der Teststrahl keine reine Elektronenkomponente aufweist, sondern, wie im Kapitel 2 beschrieben, eine Mischung aus diesen Teilchen ist. Diese werden mithilfe der Korrekturen, die im Kapitel 3 beschrieben wurden, aussortiert. Diese Teilchen werden mithilfe von Allpix² simuliert.

Allpix² ist ein Simulationsframework, dass Spuren und Vertizes von Halbleiterdetektoren simuliert [11]. Die in dieser Arbeit verwendeten Simulationen wurden hier [15] beschrieben. Es werden Simulationen verwendet, die Hadronen und Myonen durch das EPICAL-2 Kalorimeter fliegen lassen. In der vorliegenden Arbeit werden Simulationen mit Energien 20 – 80 GeV unter einer Energieverschmierung verwendet. Außerdem wird berücksichtigt, dass der ALPIDE-Sensor mit der Chip-ID 27 defekt ist.

Die Abbildungen 4.18 zeigen die Energieauflösungen σ/μ für Myon μ^+ und für die Hadronen K^+ , π^+ , p im Energiebereich $20 < E < 80$ GeV einer einzelnen Lage unter Anwendung der im Unterkapitel 3.7 beschriebenen Ereignisselektion. In allen Abbildungen sind die statistischen Unsicherheiten dargestellt, die mithilfe der Gaußschen Fehlerfortpflanzung berechnet wurden. Es lässt sich feststellen, dass trotz der Ereignisselektion weiterhin Myonen- bzw. Hadronen detektiert wurden. Bei Datenpunkten, deren Energieauflösung bei Null liegt, bedeutet dies, dass entweder keine Pixeltreffer vorhanden waren, die die Selektionskriterien erfüllten, oder dass es nur einen einzigen Eintrag in die Pixeltrefferverteilung mit einer Standardabweichung von

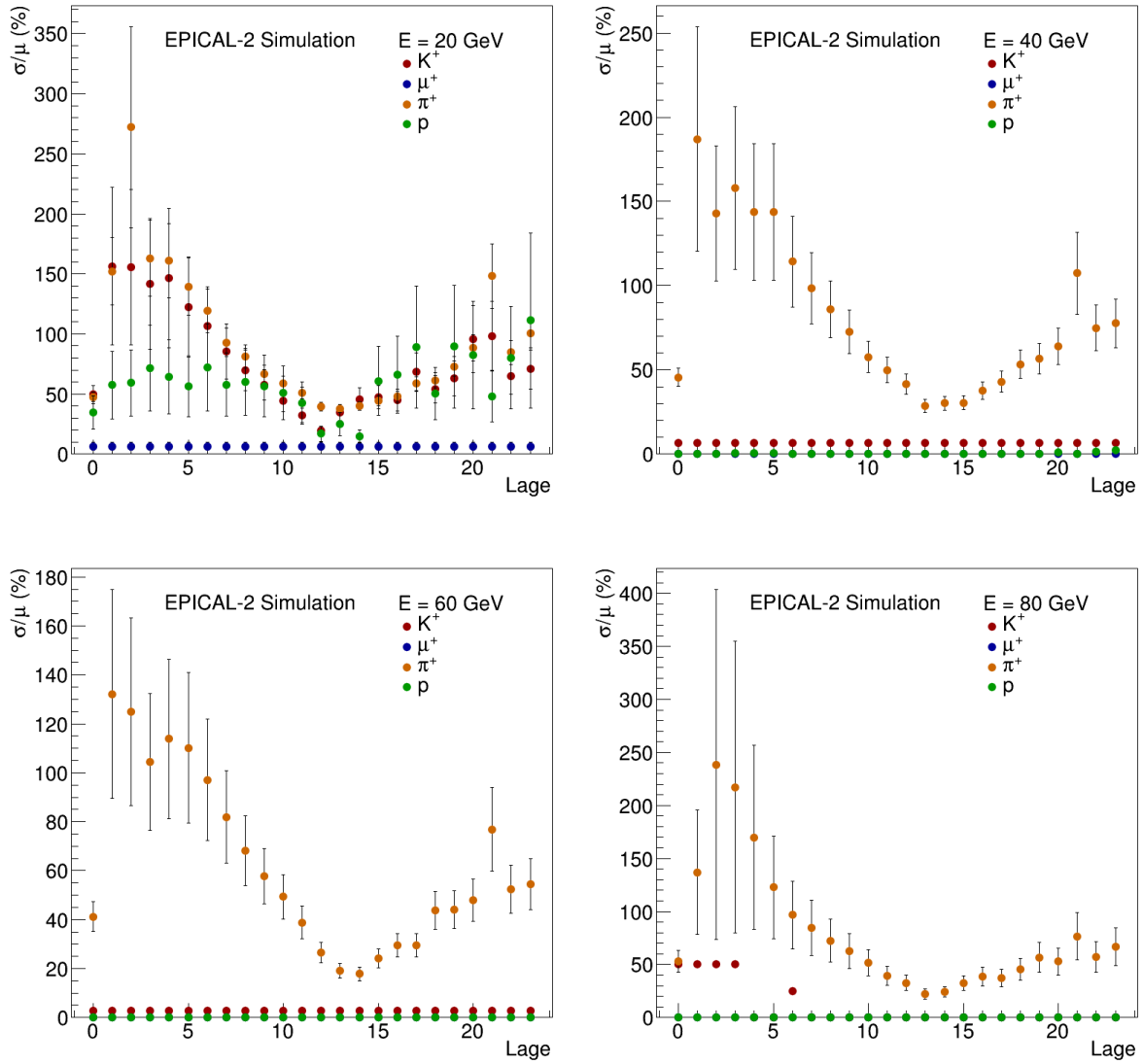


Abbildung 4.18: Myon- und Hadronenauflösung einer Lage.

$\sigma = 0$ gab. Bei jeder Verteilung verschieden von Null ist ein Minimum zu beobachten, an dem der Schauermaximum liegt. Die Verteilungen der Energieauflösungen von Myon bzw. von Hadronen zeigen eine ähnliche Entwicklung zu den Verteilungen der Energieauflösung von Elektronen.

Die Abbildungen 4.19 zeigen die Energieauflösungen σ/μ fürs Myon und die Hadronen K^+ , π^+ , p im Energiebereich $20 < E < 80$ GeV bei Maskierung einer kompletten Lage. Auch hier zeigen die Datenpunkte, deren Energieauflösung bei Null liegt, dass entweder keine Pixeltreffer vorhanden waren, die die Selektionskriterien erfüllten, oder dass es nur einen einzigen Eintrag in die Pixeltrefferverteilung mit einer Standardabweichung von $\sigma = 0$ gab. Die Verteilungen der Energieauflösungen, die von Null verschieden sind, zeigen, dass die Maskierung einer kompletten Lage dazu führt, dass sich die Verteilung entlang der maskierten Lage ähnlich verhält wie

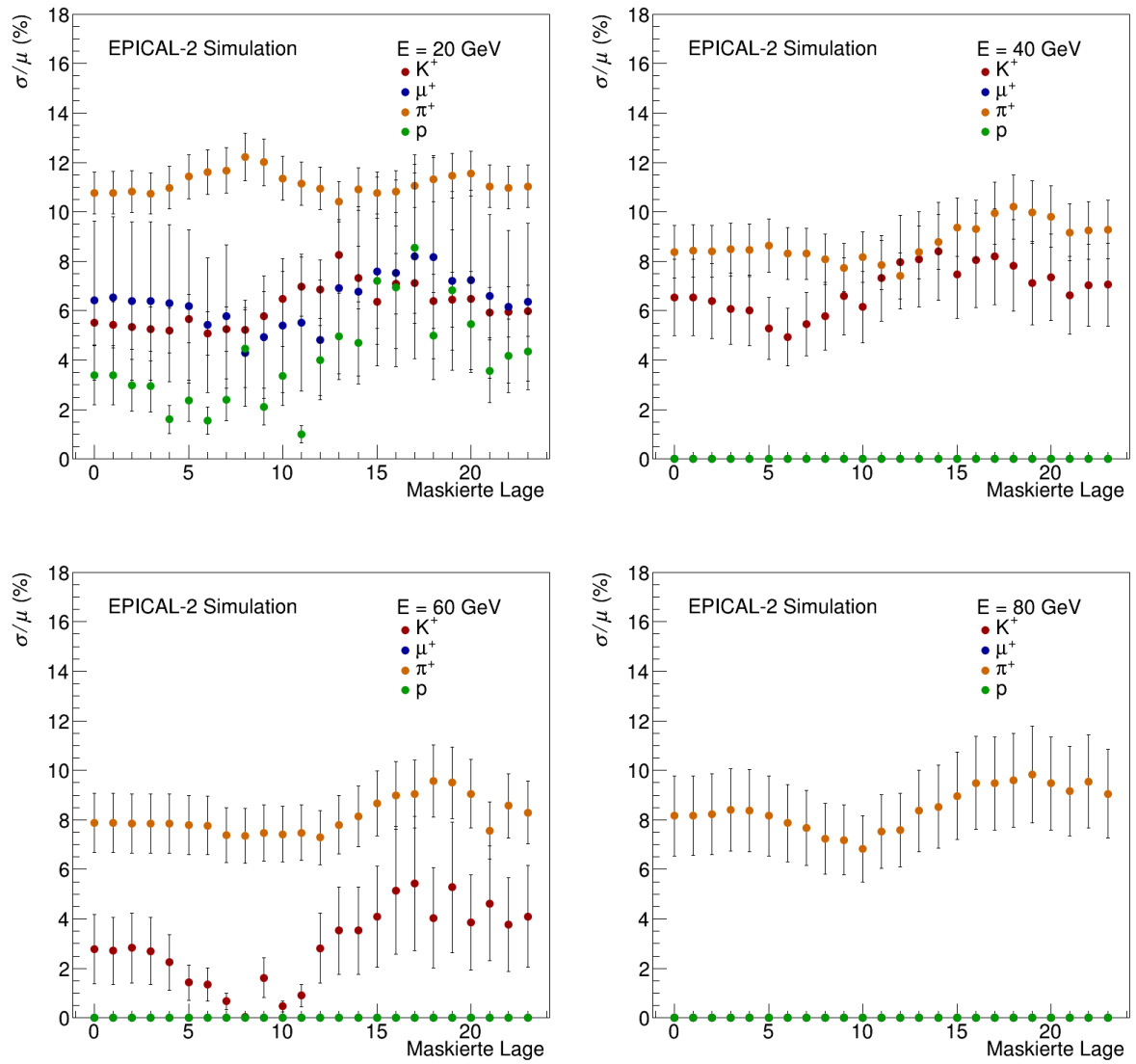


Abbildung 4.19: Myon- und Hadronenauflösung bei Maskierung einer Lage.

bei Elektronen.

Es ist ersichtlich, dass weder die Myonen noch die Hadronen einen Einfluss auf die Verschiebung des Maximums bei Maskierung einer Lage haben. Eine detaillierte Untersuchung des Phänomens würde eine separate Studie erfordern, welche den Rahmen dieser Arbeit überschreiten würde.

Zusammenfassung und Ausblick

Der EPICAL-2 ist ein Prototyp für ein digitales Pixelkalorimeter, das auf ALPIDE-Sensoren basiert. ALPIDE-Sensoren bestehen ihrerseits aus Pixeln. Der Unterschied zu gewöhnlichen Kalorimetern ist, dass das EPICAL-2 Kalorimeter eine bessere Ortsauflösung über den elektromagnetischen Schauer hat.

In dieser Arbeit wird die Bestimmung der Pixelmaske für das EPICAL-2 Kalorimeter vorgestellt und analysiert. Sie maskiert für alle Analysen unerwünschte Pixel und lässt nur die richtig funktionierenden Pixel in den ALPIDE-Sensoren. Die Pixelmaske enthält Informationen über die fehlerhaften Pixel, die mit verschiedenen Methoden identifiziert wurden. Mit drei Methoden, nämlich der Chip-Classification Methode und zwei weiteren Methoden unter Verwendung eines Teststrahls und einer blinden Messung ohne Teststrahl, werden die rauschenden und die defekten Pixel identifiziert.

Im zweiten Teil der Arbeit wird der Einfluss der Pixelmaske auf die EPICAL-2 Kalorimeter Performance untersucht. Mit einer systematischen Vorgehensweise wie zum Beispiel der Erhöhung der Anzahl der Maskierung der Pixel bzw. der Spalten in jedem ALPIDE-Sensor wird die Kalorimeter Performance, also die Detektorantwort und die Energieauflösung, untersucht. Bei der Pixel bzw. Spaltenmaskierung wird festgestellt, dass sich die Detektorantwort bis zu 50 % verringert, wenn 60 % der Pixel bzw. der Spalten maskiert werden.

Ein weiterer Fall, der in dieser Arbeit untersucht wird, ist die Maskierung von Zeilen zwischen zwei ALPIDE-Sensoren einer Lage. Bei Maskierung der Zeilen wird eine Verschlechterung der Energieauflösung von bis zu $\sim 8\%$ für 12 maskierten Zeilen festgestellt. Der Abstand zwischen zwei ALPIDE-Sensoren einer Lage hat also einen sehr starken Einfluss auf die Kalorimeter Performance.

Zum Schluss wird die Maskierung einzelner Lagen untersucht und festgestellt, dass die Energieauflösung in Abhängigkeit von den Lagen ein nicht erwartetes Verhalten bei den SPS-Daten zeigt, nämlich bei Energie zwischen 20 GeV und 80 GeV. Es ist eine Schwelle bei den Lagen zwischen 15 und 20 zu beobachten. In der vorliegenden Arbeit wurde der Fall untersucht, dass Hadronen bzw. Myonen die Ursache sind. Dafür wurde Allpix² Simulationen verwendet, wo einzelne Hadronen bzw. Myonen das EPICAL-2 Kalorimeter treffen und dort schauern. Allerdings haben die Ergebnisse gezeigt, dass die Energieauflösungen bei auch einen ähnlichen

Effekt gezeigt. Eine Idee, die vielleicht ein Thema zukünftiger Analysen sein könnten, wäre die Variation des Auswahlbereiches bei der Ereignisselektion. Für die vorliegende Analyse wurde bei den SPS-Daten 5σ Bereich um den Mittelwert der Pixeltrefferverteilungen ausgewählt. Man könnte untersuchen, wie sich die Energieauflösung bei Verkleinern dieses Bereiches ändert.

Anhang

Zuordnung der ALPIDE-Sensoren in den Lagen

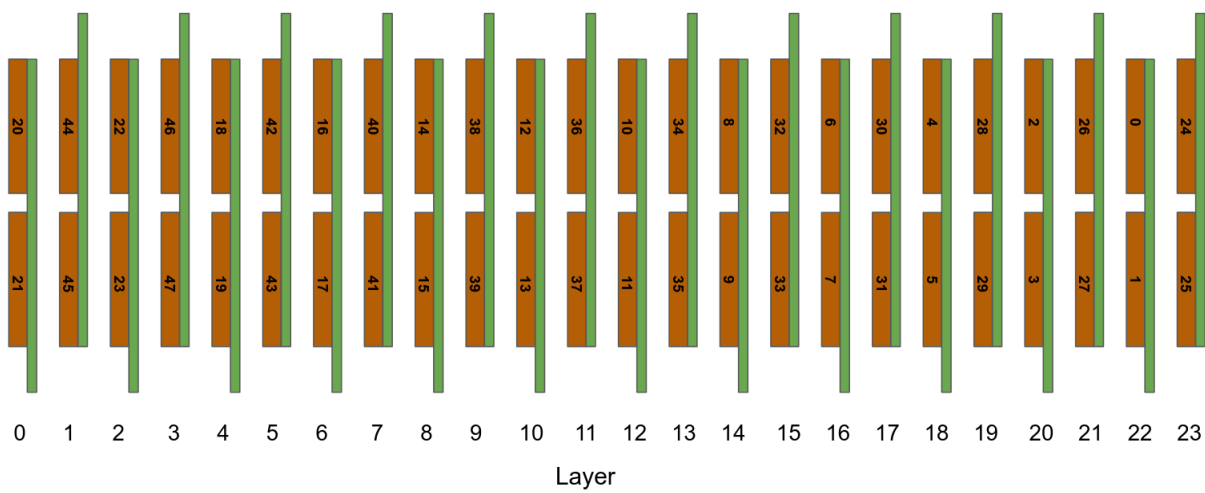
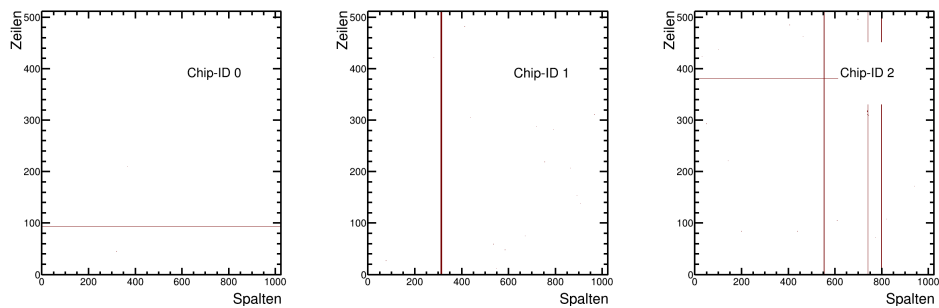
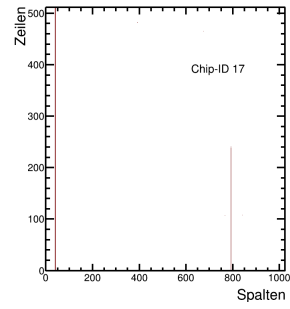
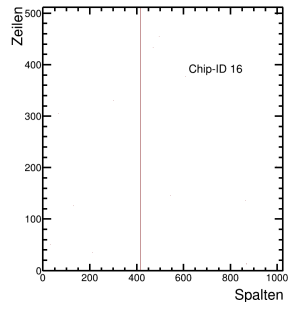
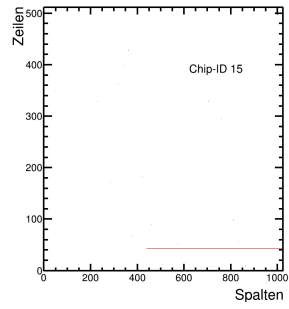
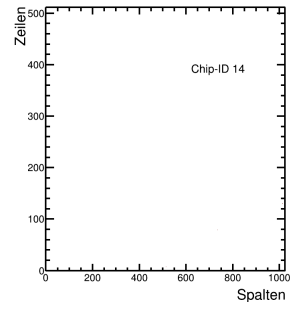
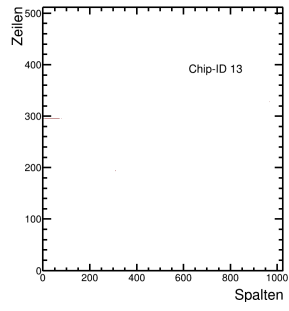
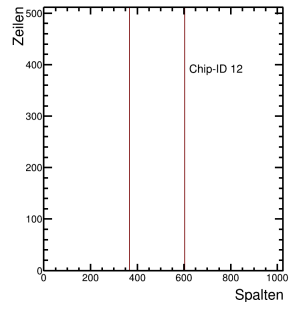
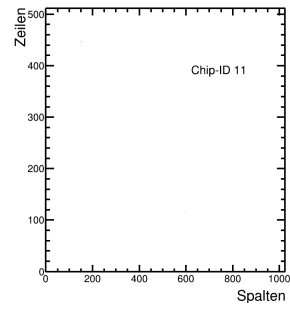
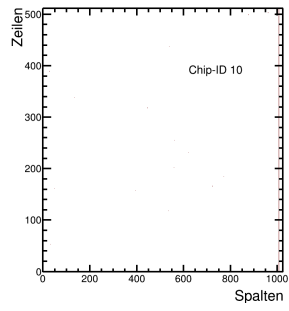
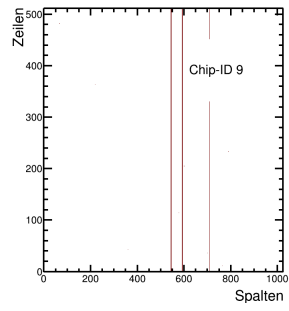
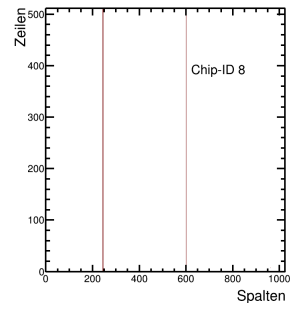
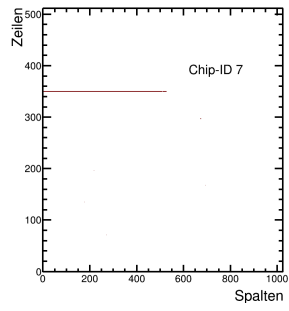
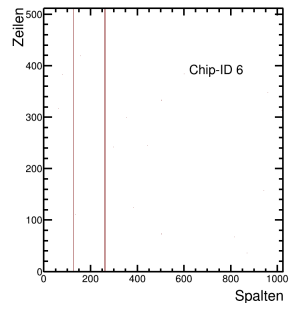
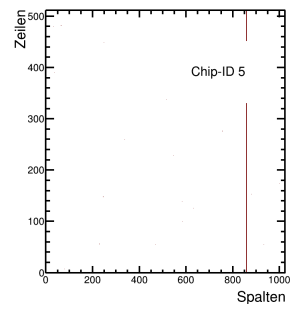
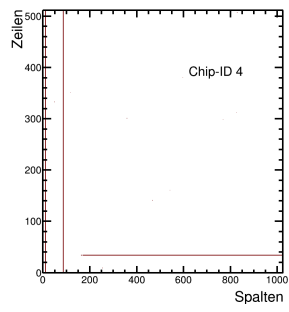
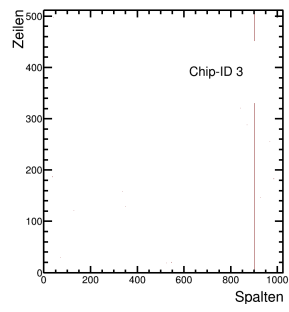
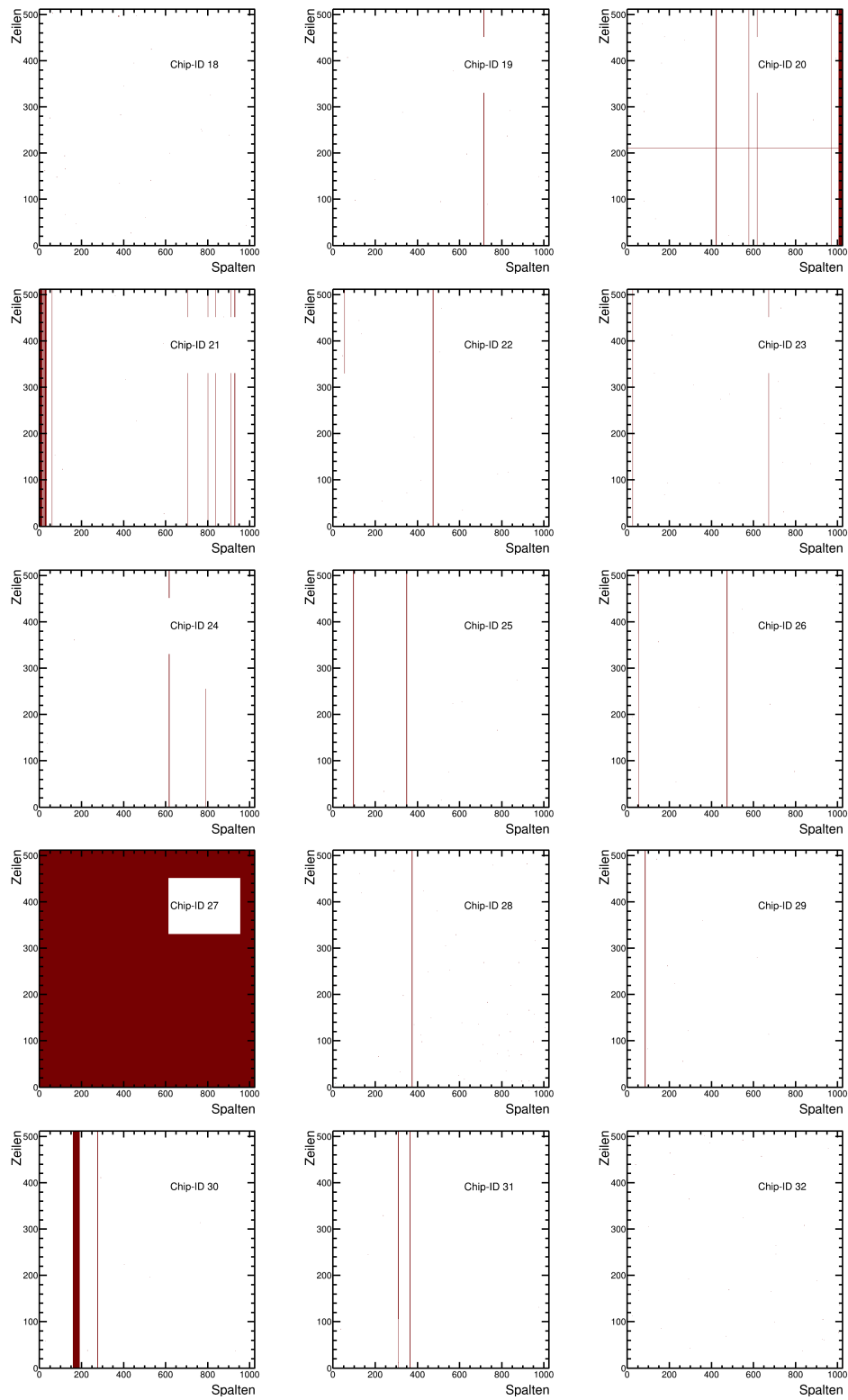


Abbildung 4.20: Zuordnung der ALPIDE-Sensoren nach ihrer Chip-ID in den entsprechenden Lagen.

Pixelmasken für alle ALPIDE-Sensoren des EPICAL-2 Kalorimeters







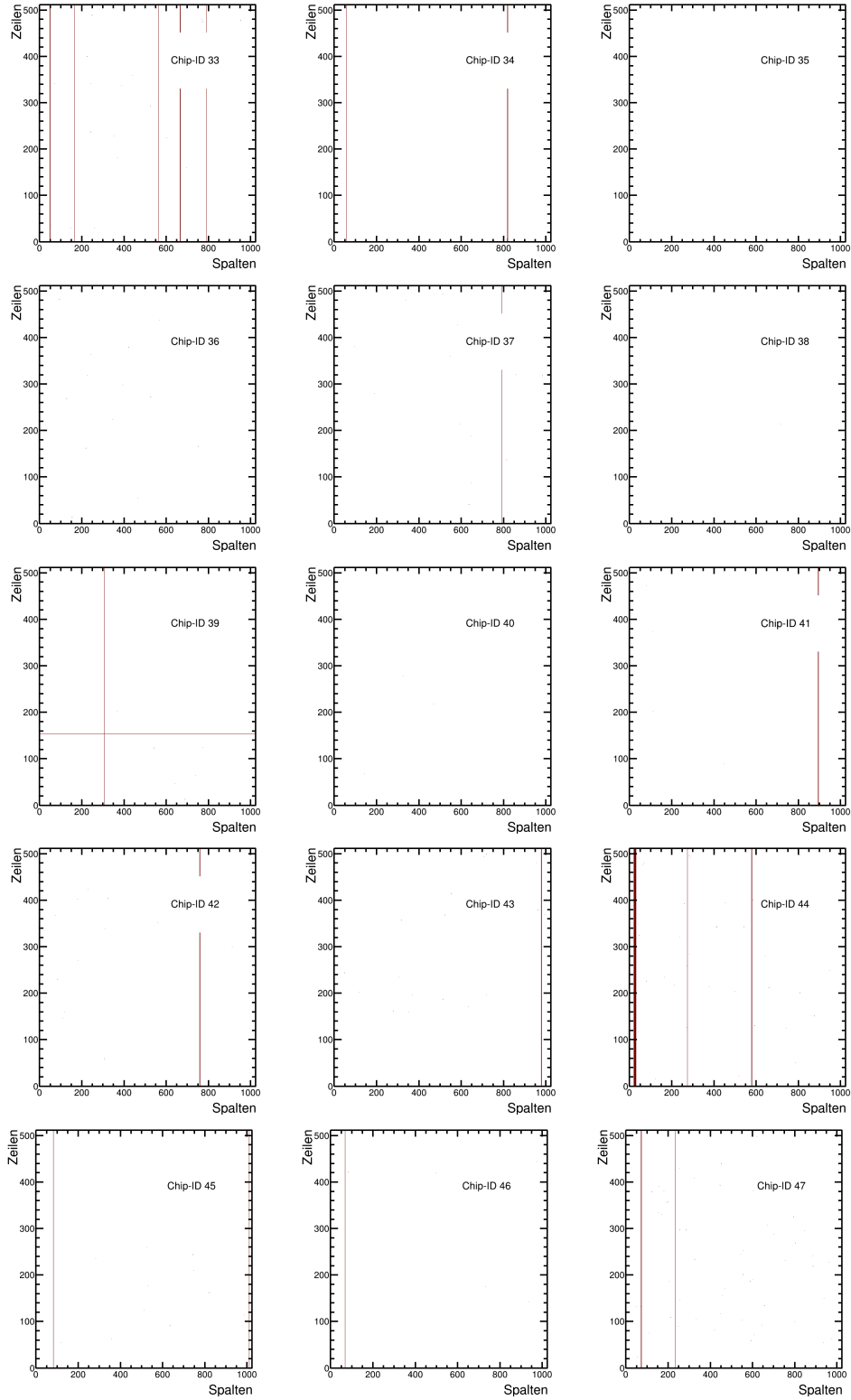


Abbildung 4.21: Pixelmasken aller ALPIDE-Sensoren angeordnet nach ihrer Chip-ID.

Datensatz

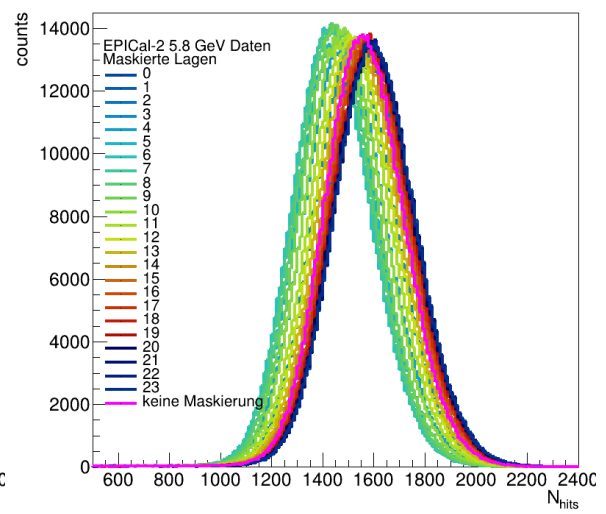
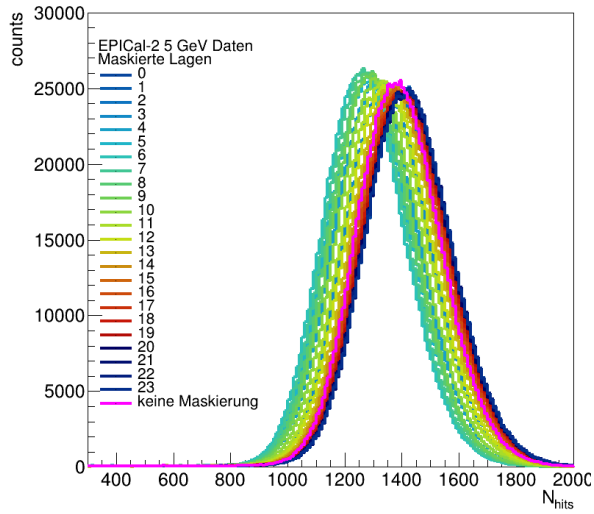
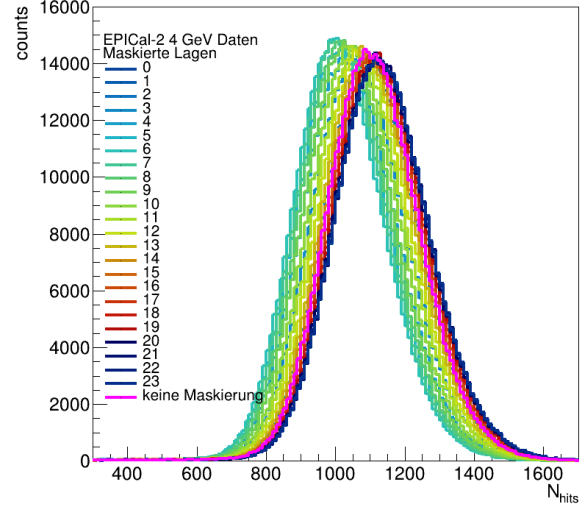
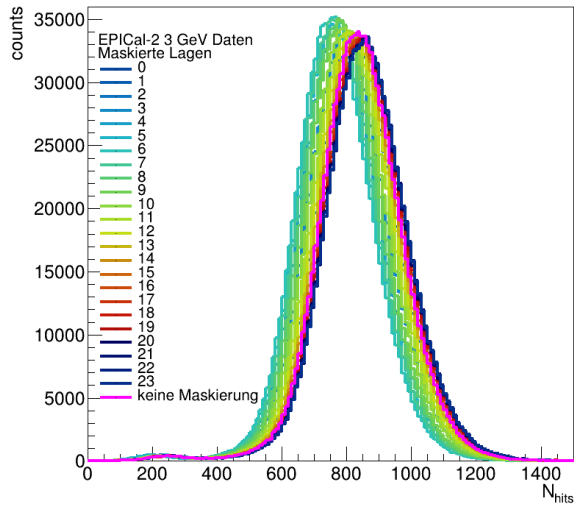
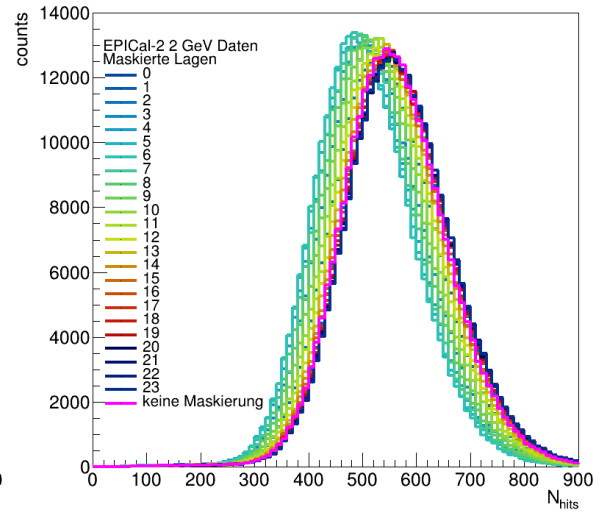
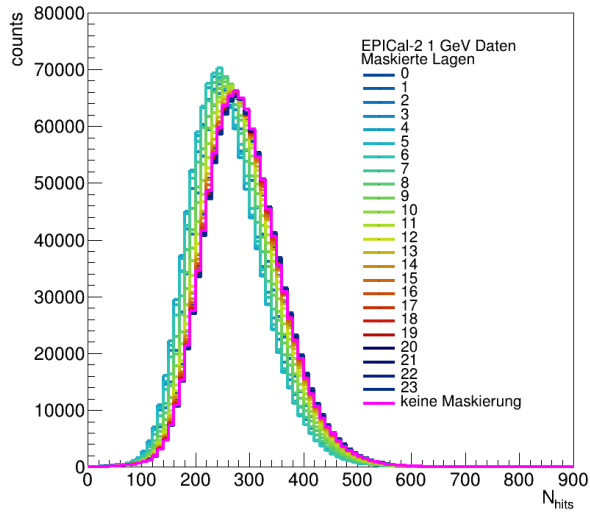
DESY Messung			CERN-SPS Messung		
Run	E (GeV)	Ereignisse	Run	E (GeV)	Ereignisse
1250	5	522000	2951	20	401
1521	3	522000	2956	20	375
1252	1	522000	2960	20	2666
1253	4	82500	2963	20	5748
1257	4	522000	2964	80	25800
1260	2	522000	2965	80	25625
1261	5	522000	2966	80	64388
1262	3	244501	2967	80	41081
1263	1	522000	2970	80	52397
1274	4	522000	2971	80	47640
1276	2	522000	2972	80	54000
1308	5	294000	2973	80	67266
1309	5.8	141527	2974	60	21437
1310	5.8	277880	2975	60	6271
1333	5	295500	2977	60	33976
1335	3	297000	2978	60	50200
1336	1	594000	2979	40	58354
1337	2	594000	2980	40	77447
1338	4	297000	2983	40	7698
1339	5	747000	2985	40	34384
1341	3	747000	2988	40	59461
1343	1	744000	2992	80	92952
1344	2	735000	2993	80	85001
1345	4	744000	2995	60	42639
1346	5.8	617749	2997	20	514
1375	5.8	391733	2998	20	3720
1376	5.8	89798	2999	20	2925
1413	5	1103742	3000	20	3625
			3001	20	3516
			3007	20	55

Tabelle 4.1: Übersicht über die aufgenommenen Daten mit dem EPICAL-2 Kalorimeter während der DESY und der CERN-SPS Teststrahlungsmessung.

DESY Messung	CERN-SPS Messung
Run	Run
1232	2952
1246	2954
1303	2984
1311	2986
1326	2989
1329	2991
1330	2996
1332	3006
1356	3018
1368	
1374	
1395	
1396	
1421	
1438	
1463	

Tabelle 4.2: Übersicht über die aufgenommenen Daten mit dem EPICAL-2 Kalorimeter während der DESY und der CERN-SPS Teststrahlungsmessung ohne Verwendung eines Teststrahls.

Pixeltrefferverteilungen bei Maskierung einer Lage



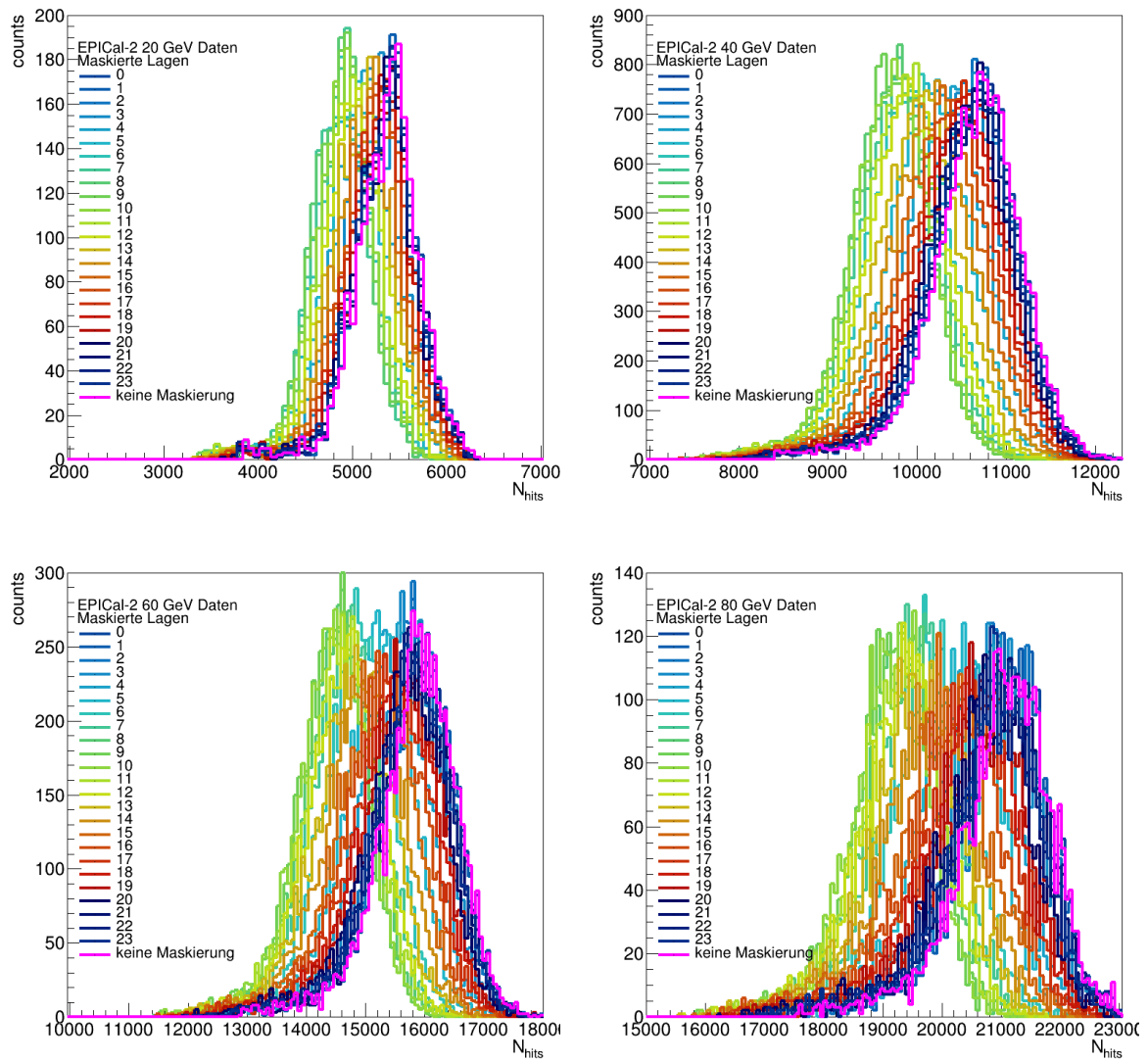


Abbildung 4.22: Pixeltrefferverteilungen bei Maskierung einer Lage für Elektronen aus einem Teststrahl bei einer gemessenen Energie.

Literatur

1. H. Kolanoski, Norbert Wermes, „Teilchendetektoren-Grundlagen und Anwendungen“, SpringerSpektrum Verlag, Auflage 2016.
2. <https://pdg.lbl.gov/2022/reviews/rpp2022-rev-passage-particles-matter.pdf>, aufgerufen am 20.04.2024.
3. M. Thomson, „Modern Particle Physics“, Cambridge University press, Auflage 2013.
4. <https://de.wikipedia.org/wiki/P-n-%C3%9Cbergang>, aufgerufen am 20.06.2024
5. <https://www.halbleiter.org/grundlagen/dotieren/>, aufgerufen am 26.06.2024
6. <https://www.physi.uni-heidelberg.de/Einrichtungen/FP/anleitungen/F96.pdf>, aufgerufen am 22.04.2024.
7. J. Alme et al, „Performance of the electromagnetic pixel calorimeter prototype EPICAL-2“, In: *Journal of Instrumentation* 18.01 (Jan. 2023), P01038. DOI:10.1088/1748-0221/18/01/P01038
8. <https://cerncourier.com/a/alice-tracks-new-territory/>, aufgerufen am 14.04.2024.
9. https://indico.cern.ch/event/837899/contributions/3570823/attachments/1913793/3163234/ImageWorkshop_UiB_GaneshTambave.pdf, aufgerufen am 28.04.2024.
10. R. Diener et al. *The DESY II test beam facility*. Nucl. Instrum. Meth. A, 922:265–286, 2019. doi:10.1016/j.nima.2018.11.133.
11. <https://allpix-squared.docs.cern.ch/>, aufgerufen am 19.04.2024.
12. https://indico.cern.ch/event/930778/contributions/3912373/attachments/2063047/3461311/ALPIDE_series_mass_testing_and_classification-2.pdf, aufgerufen am 04.05.2024
13. M. Ester, H P. Kriegel, J. Sander, Xu Xiaowei, „A density-based algorithm for discovering clusters in large spatial databases with noise“, in *Proceedings of the Second International Conference on Knowledge Discovery and Data Mining (KDD-96)*, 1996.

14. T. Rogoschinski, „Performance of the Electromagnetic Pixel Calorimeter EPICAL-2 and Soft-Photon Background Studies in ALICE 3“, *Phd Thesis, Johann Wolfgang Goethe Universität Frankfurt am Main*, 2023.
15. J. Keul, „Performance Studies of the Digital Pixel Calorimeter Prototype EPICAL-2“, *Masterarbeit, Johann Wolfgang Goethe Universität Frankfurt am Main*, 2024.
16. M. Cacciari, „The anti- k_t jet clustering algorithm“, *ArXiv: 0802.1189v2 [hep-ph] 21 Apr 2008*.

Danksagung

”Das Schönste ist gerecht zu sein, das Beste die Gesundheit, das Angenehmste, wenn man immer erreicht, was man will” (Sophokles). In diesem Sinne möchte ich mich bei Prof. Henner Büsching für die tolle Gelegenheit in seiner Arbeitsgruppe und an einem sehr interessanten Gebiet zu arbeiten. Ausserdem möchte ich mich bei allen Mitgliedern der Arbeitsgruppe bedanken für die hilfreiche Unterstützung. Genauer gesagt möchte ich mich bei Fabian Pliquet, Tim Rogoschinski, Johannes Keul, Jan Schöngarth, Mario Krüger, Maria A. Calmon Behling, Jan Scharf, Joshua König, Nicolas Strangmann, Stefanie Mrozinski, Youssef El Mard, Marvin Hemmer, Matthias Kleiner und zu guter Letzt bei Laura Gans Bartl.

Darüber hinaus möchte ich mich bei Prof. Thomas Peitzmann und bei Prof. Nigel Watson für ihre Expertise und ihre Unterstützung bedanken.

Als Letztes möchte ich mich bei meiner Familie für die tolle Unterstützung bedanken.

Eigenständigkeitserklärung

Erklärung nach § 39 (15) Prüfungsordnung 2020 für den BAMA-Studiengang Physik

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: Frankfurt am Main, 02.07.2024

Unterschrift: