

**Systematische Studie der Peakextraktion  
neutraler Pionen in pp-Kollisionen bei  
 $\sqrt{s} = 13 \text{ TeV}$  mit Hilfe von Templates**

Bachelorarbeit

vorgelegt von

**Marvin Hemmer**

am Institut für Kernphysik

dem Fachbereich Physik

der Goethe Universität Frankfurt am Main

Februar 2019

## Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Theoretische Grundlagen</b>	<b>2</b>
1.1	Standardmodell der Elementarteilchenphysik . . . . .	2
1.2	Starke Wechselwirkung und das Quark-Gluon-Plasma . . . . .	3
1.3	Messung neutraler Pionen zur Untersuchung des Quark-Gluon-Plasma . . . . .	5
<b>2</b>	<b>Experimenteller Aufbau</b>	<b>6</b>
2.1	ALICE . . . . .	6
2.2	elektromagnetische Kalorimeter EMCal . . . . .	6
<b>3</b>	<b>Analyse</b>	<b>6</b>
3.1	Datenauswahl . . . . .	6
3.1.1	Datensatz . . . . .	6
3.1.2	Clusterauswahlkriterien . . . . .	6
3.2	Rekonstruktion neutraler Pionen . . . . .	6
3.3	Abschätzung des unkorrelierten Untergrunds . . . . .	6
3.4	Peak Extraktion mit Hilfe von Parametrisierungen von Funktionen . . . . .	6
3.4.1	Abschätzung des korrelierten Untergrunds . . . . .	6
3.5	Peak Extraktion mit Hilfe von Parametrisierungen von Templates . . . . .	6
3.5.1	Template des Signals . . . . .	6
3.5.2	Template des korrelierten Untergrunds . . . . .	6
3.5.3	Parametrisierungsmethode . . . . .	6
3.5.4	Abzug des korrelierten Untergrunds und Integration des Signals . . . . .	6
<b>4</b>	<b>Korrigierter Yield</b>	<b>6</b>
4.1	Korrekturen . . . . .	6
4.2	Systematische Unsicherheit . . . . .	6
<b>5</b>	<b>Zusammenfassung und Ausblick</b>	<b>6</b>

# Einleitung

## 1 Theoretische Grundlagen

### 1.1 Standardmodell der Elementarteilchenphysik

Die Kraft, die ein Teilchen auf ein anderes auswirkt, wird durch Wechselwirkung vermittelt. Man kann auch sagen, dass die Kraft, beziehungsweise die Wechselwirkung an ein Teilchen koppelt. Die Stärke der Kopplung spiegelt sich in der sogenannten Kopplungskonstante wieder. Wechselwirkungen umfassen, neben der Kraft von einem Teilchen auf ein anderes, aber auch Zerfälle oder Anihilationen. Nach dem heutigen Stand der Wissenschaft gibt es vier fundamentale Wechselwirkungen: die schwache Wechselwirkung, die starke Wechselwirkung, die elektromagnetische Wechselwirkung und die Gravitation. Das Standardmodell der Elementarteilchenphysik beschreibt als eine Theorie die starke, die schwache und die elektromagnetische Wechselwirkung, sowie alle bekannten Elementarteilchen. Elementarteilchen sind der Grundbaustein von Materie und zeichnen sich dadurch aus, dass sie, nach aktuellem Wissensstand, nicht weiter teilbar sind.

Die Elementarteilchen teilen sich in zwei Gruppen auf, die Quarks und die Leptonen. Beide Gruppe beinhalten sechs Teilchen. Es gibt folgende sechs Quarks: *up* ( $u$ ), *down* ( $d$ ), *strange* ( $s$ ), *charm* ( $c$ ), *bottom* ( $b$ ) und *top* ( $t$ ) und folgende sechs Leptonen: Elektron ( $e$ ), Elektron-Neutrino ( $\nu_e$ ), Myon ( $\mu$ ), Myon-Neutrino ( $\nu_\mu$ ), Tau ( $\tau$ ) und Tau-Neutrino ( $\nu_\tau$ ). Beide Gruppen kann man weiter aufteilen in insgesamt drei Generationen. Die Generationen der Leptonen und Quarks hängen dabei nicht zusammen und sind mit der Masse aufsteigend geordnet. In Tabelle 1 sind die Elementarteilchen bezüglich ihrer Generation und Ladung sortiert aufgelistet. Zu den Elementarteilchen gibt es entsprechende Antiteilchen, mit umgekehrter Ladung, wie beispielsweise das Positron, das Antiteilchen des Elektrons mit einfach positiver elektrischer Ladung. Für diese Arbeit sind besonders das  $u$  und  $d$  Quark, sowie das Elektron und die entsprechenden Antiteilchen von Bedeutung.

Generation	I	II	III	el. Ladung
Quarks	up ( $u$ )	charm ( $c$ )	top ( $t$ )	+2/3
	down ( $d$ )	strange ( $s$ )	bottom ( $b$ )	-1/3
Leptonen	Elektron ( $e$ )	Myon ( $\mu$ )	Tau ( $\tau$ )	-1
	Elektron-Neutrino ( $\nu_e$ )	Myon-Neutrino ( $\nu_\mu$ )	Tau-Neutrino ( $\nu_\tau$ )	0

Tabelle 1: Elementarteilchen geordnet nach ihrer Generation und ihrer elektrischen Ladung

Die Ladung als eine Eigenschaft, die Teilchen besitzen können, ermöglicht die Teilnahme an ein-

er Wechselwirkung. Die Höhe der Ladung bestimmt, wie stark ein Teilchen durch die entsprechende Wechselwirkung beeinflusst wird. Dabei gilt es zwischen verschiedenen Ladungen zu unterscheiden. Die elektrische Ladung ermöglicht die Teilnahme an der elektrischen Wechselwirkung, die sogenannte Farbladung hingegen die Teilnahme an der starken Wechselwirkung. Der Vollständigkeit halber sei an dieser Stelle die schwache Ladung für die schwache Wechselwirkung und die Masse für die Gravitation erwähnt.

Das Koppeln von Kräften zwischen zwei Teilchen wird im Standardmodell durch das Austauschen von einem sogenannten Austauschteilchen vermittelt. Zu den bekannten Austauschteilchen gehören Photonen ( $\gamma$ ), Gluonen ( $g$ ), Z- und W-Bosonen ( $Z^0$  &  $W^\pm$ ). Alle genannten Austauschteilchen besitzen einen ganzzahligen Spin von 1 und sind deshalb Bosonen. Tabelle 2 zeigt die Zuordnung der Austauschteilchen zu ihrer entsprechenden Wechselwirkung. Im folgenden Kapitel wird genauer auf Quarks, Gluonen und die Farbladung eingegangen.

Wechselwirkung	elektromagnetisch	stark	schwach
Austauschteilchen	Photon ( $\gamma$ )	Gluon ( $g$ )	$W^\pm, Z^0$ - Bosonen

Tabelle 2: Austauschteilchen der entsprechende Wechselwirkung zugeordnet

## 1.2 Starke Wechselwirkung und das Quark-Gluon-Plasma

Farbladung hat drei mögliche „Werte“: rot, blau und grün. Die drei Antifarben sind entsprechend antirot, antiblau und antigrün. Die Kombination der drei (Anti)Farben, oder die Kombination Farbe mit passender Antifarbe ergibt weiß. Quarks und Gluonen tragen jeweils Farbladung. Dadurch können sowohl Quarks auch auch Gluonen an der starken Wechselwirkung teilnehmen. Unter anderem bindet die starke Wechselwirkung Quarks und Gluonen zu anderen Teilchen. Teilchen einer solchen Bindung kann man unterteilen in sogenannte Baryonen ( $qqq$ ) und Mesonen ( $q\bar{q}$ ), sowie entsprechend Antiteilchen. Alle aus Quarks bestehenden Teilchen nennt man Hadronen. Proton und Neutronen sind beispielsweise zwei Hadronen, welche aus  $u$  und  $d$  bestehen. Die Gluonen sorgen als virtuelle Teilchen für einen ständigen Farbaustausch innerhalb von Hadronen. Hadronen selbst sind dabei immer weiß, man sagt auch, Hadronen sind farbneutral nach außen hin. In der Natur kommen nur farbneutrale Teilchen vor, es gibt keine freie Farbladung. Das Phänomen, das es keine freien farbgeladenen Teilchen gibt ist das sogenannte *Confinement*. Um das *Confinement* besser zu verstehen muss man sich die Kraft, beziehungsweise das Potential, der starken Wechsel-

wirkung genauer ansehen.

Die Kraft, die auf farbgeladene Teilchen wirkt, folgt aus einem Potential  $V(r)$ .  $V(r)$  besitzt einen anziehenden Teil und einen abstoßenden Teil. Der anziehende Teil weist dabei eine Proportionalität zum Abstand  $r$  zweier farbgeladener Teilchen auf, während der abstoßende Teil eine Antiproportionalität zu  $r$  aufweist. Der abstoßende Teil ist zusätzlich proportional zur Kopplungskonstante der starken Wechselwirkung  $\alpha_s$ . Es gilt:

$$V(r) = -\frac{4}{3} \frac{\alpha_s}{r} + kr \quad (1)$$

Für große  $r$  wird der anziehende Teil also immer stärker. Will man also zwei farbgeladene Teilchen wie etwa ein Quark-Antiquark-Paar von einander trenne, so müsste man immer mehr Energie aufwenden, je weiter sich die beiden Teilchen von einander weg befinden. Ab einem bestimmten Punkt wird die benötigte Energie so groß, dass sie ausreicht ein weiteres Quark-Antiquark-Paar zu erzeugen. Deshalb sind Quarks und Gluonen nicht direkt messbar, was die Untersuchung von Quarks, Gluonen und der starken Wechselwirkung erschwert. Um zu erklären, wie die starke Wechselwirkung, Quarks und Gluonen trotzdem untersucht werden können muss man sich  $\alpha_s$  genauer anschauen.

Anders als die Bezeichnung vermuten lässt ist die Kopplungskonstante nämlich nicht konstant. Stattdessen hängt  $\alpha_s$  vom Impulsübertragsquadrat  $Q^2$  zwischen zwei Teilchen ab. Das Impulsübertragsquadrat  $Q^2$ , bzw. der Impulsübertrag  $Q$  hängt dabei selbst über die De-Broglie-Wellenlänge mit dem Abstand  $r$  zusammen. Es gilt  $Q = \frac{h}{\lambda}$ , wobei  $\lambda$  die räumliche Auflösung beschreibt. Für eine genau Auflösung, also für sehr kleine  $r$  muss  $Q$  und damit auch  $Q^2$  groß sein.  $\alpha_s$  hängt also antiproportional von  $r$  ab. Aufgrund dieses Zusammenhangs nennt man  $\alpha_s$  auch *running*  $\alpha_s$ . Abbildung ?? [BILD] zeigt den Verlauf von  $\alpha_s$  in Abhängigkeit von  $Q^2$ . Den Zustand für sehr kleine  $\alpha_s$  nennt man asymptotische Freiheit, da sich innerhalb dieses Zustands Quarks und Gluonen quasi frei bewegen können. Um so einen Zustand erzeugen zu können braucht man eine hohe Dichte von Quarks und Gluonen oder eine hohe Temperatur. Eine verbreitete theoretische Beschreibung eines Mediums in diesem heißen und dichten Zustand ist das sogenannte Quark-Gluon-Plasma.

Ein heißer und dichter Zustand wird bei der Kollision von zwei Atomkernen erzeugt. Dieser Zustand entsteht kurz nach der Kollision. Quarks und Gluonen, die aus diesem Medium kommen,

müssen, während der sogenannten Hadronisierung, wieder zu Hadronen werden. Diese Hadronen zerfallen, insofern sie keine stabilen Teilchen sind, wie das Proton. Es kann auch zu ganzen Zerfallsketten kommen, bis die Endteilchen nicht mehr zerfallen. Je nach dem, wie schnell Teilchen zerfallen können entweder diese oder ihre Zerfallsprodukte gemessen werden und liefern indirekt Aufschluss auf Eigenschaften des heißen und dichten Zustands.

### 1.3 Messung neutraler Pionen zur Untersuchung des Quark-Gluon-Plasma

Das neutrale Pion ( $\pi^0$ ) ist ein Meson und besteht also aus einem Quark-Antiquark-Paar. Genauer lässt sich das  $\pi^0$  als eine Überlagerung zweier quantenmechanischer Zustände beschreiben:

## 2 Experimenteller Aufbau

### 2.1 ALICE

### 2.2 elektromagnetische Kalorimeter EMCal

## 3 Analyse

### 3.1 Datenauswahl

#### 3.1.1 Datensatz

#### 3.1.2 Clusterauswahlkriterien

### 3.2 Rekonstruktion neutraler Pionen

### 3.3 Abschätzung des unkorrelierten Untergrunds

### 3.4 Peak Extraktion mit Hilfe von Parametrisierungen von Funktionen

#### 3.4.1 Abschätzung des korrelierten Untergrunds

### 3.5 Peak Extraktion mit Hilfe von Parametrisierungen von Templates

#### 3.5.1 Template des Signals

#### 3.5.2 Template des korrelierten Untergrunds

#### 3.5.3 Parametrisierungsmethode

#### 3.5.4 Abzug des korrelierten Untergrunds und Integration des Signals

## 4 Korrigierter Yield

### 4.1 Korrekturen

### 4.2 Systematische Unsicherheit

## 5 Zusammenfassung und Ausblick