

**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

# Einleitung

## 1 Theoretische Grundlagen

Theorien dienen nicht nur zur Beschreibung physikalischer Phänomene, sondern helfen auch das bekannte Wissen zu strukturieren. In der Elementarteilchenphysik ist die gängigste Theorie das sogenannte Standardmodell der Elementarteilchenphysik, auf welches im Folgenden näher eingegangen wird.

### 1.1 Standardmodell der Elementarteilchenphysik

Das Standardmodell der Elementarteilchenphysik unterteilt die sogenannten Elementarteilchen in zwei Gruppen, die sogenannten Quarks und die sogenannten Leptonen. Als Elementarteilchen werden alle Teilchen bezeichnet, die nicht weiter teilbar sind. Beide Gruppe beinhalten nach aktuellem Wissensstand jeweils sechs Teilchen, die sechs Quarks, *up* ( $u$ ), *down* ( $d$ ), *strange* ( $s$ ), *charm* ( $c$ ), *bottom* ( $b$ ) und *top* ( $t$ ) und die sechs Leptonen, Elektron ( $e$ ), Elektron-Neutrino ( $\nu_e$ ), Myon ( $\mu$ ), Myon-Neutrino ( $\nu_\mu$ ), Tau ( $\tau$ ) und Tau-Neutrino ( $\nu_\tau$ ). In Tabelle 1 sind die Elementarteilchen bezüglich ihrer sogenannten Generation und ihrer elektrischen Ladung sortiert aufgelistet. Die Aufteilung in die Generationen erfolgt nach der Masse der Elementarteilchen. Die erste Generation besteht aus den leichtesten Elementarteilchen, die dritte Generation hingegen aus den schwersten Elementarteilchen. Die Generationen der Leptonen und Quarks sind dabei unabhängig voneinander. Zu jedem Elementarteilchen existiert ein entsprechendes Antiteilchen, mit entgegengesetzten Ladungen.

Generation	I	II	III	el. Ladung [e]
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 elektrische Ladung

Im Standardmodell der Elementarteilchenphysik gibt es drei unterschiedliche Ladungen, die elektrische Ladung, die starke Ladung und die schwache Ladung. Jede dieser Ladungen lässt sich einer sogenannten Wechselwirkung zuordnen. Die drei Wechselwirkungen innerhalb des Standardmodells sind die elektromagnetische Wechselwirkung, die starke Wechselwirkung und die schwache Wechselwirkung. Die Werte der Ladungen bestimmen, wie stark ein Teilchen durch die entspre-

chenden Wechselwirkungen beeinflusst wird. Die Kraft, die ein geladenes Teilchen auf ein anderes, gleichartig geladenes Teilchen ausübt, wird so durch Wechselwirkungen vermittelt. Man kann auch sagen, dass die Kraft, beziehungsweise die Wechselwirkung an ein geladenes Teilchen koppelt. Wechselwirkungen beschreiben, neben der Kraft von einem Teilchen auf ein anders Teilchen, aber auch Zerfälle oder Annihilationen von Teilchen.

Kräfte zwischen zwei Teilchen werden durch das Austauschen von einem sogenannten Austauscheteilchen vermittelt. Zu den bekannten Austauscheteilchen gehören das Photon ( $\gamma$ ), das Gluon ( $g$ ), das Z-Boson und die W-Bosonen ( $Z^0$  &  $W^\pm$ ). Tabelle 2 zeigt die Zuordnung der Austauscheteilchen zu ihrer entsprechende Wechselwirkung. Im folgenden Abschnitt wird genauer auf Quarks, Gluonen und die Ladung der starken Wechselwirkung eingegangen.

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

Tabelle 2: Austauscheteilchen der entsprechende Wechselwirkung zugeordnet

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

Die Ladung der starken Wechselwirkung wird allgemein als Farbladung bezeichnet. Farbladung hat drei mögliche “Werte”: rot, blau und grün. Dabei spielt der “Wert“ der Farbladung für die Stärke der starken Wechselwirkung keine Rolle. Zusätzlich zu den drei Farbladungen gibt es auch drei Antifarben. Die drei Antifarben sind entsprechend antirot, antiblau und antigrün. Die Kombination der drei (Anti)Farben, oder die Kombination Farbe mit passender Antifarbe ergibt weiß, angelehnt an die Farblehre. Weiße Teilchen entsprechen nach außen hin farblosen Teilchen, auch wenn sie aus farbgeladenen Teilchen aufgebaut sind. Die Farbladung gibt keine Information über die Tatsächliche Farbe der Teilchen. 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. Die Gluonen sorgen als virtuelle Teilchen für einen ständigen Farbaustausch innerhalb von Hadronen. Hadronen selbst sind dabei immer farbneutral. In der Natur kommen nur farbneutrale Teilchen vor, es gibt keine freie Farbladung. Dieses Phänomen ist das sogenannte *Confinement*. Um das *Confinement* besser zu

verstehen muss man sich die Kraft, beziehungsweise das Potential, der starken Wechselwirkung genauer ansehen.

Die Kraft, die auf farbgeladene Teilchen wirkt, folgt aus einem Potential  $V(r)$ . Dieses  $V(r)$  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 sogenannten 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 trennen, so müsste man immer mehr Energie aufwenden, je weiter man die Teilchen von einander entfernt. Ab einem bestimmten Punkt wird die benötigte Energie so groß, dass sie ausreicht ein weiteres Quark-Antiquark-Paar zu erzeugen. Diese Erzeugung eines neuen Quark-Antiquark-Paares findet immer statt sobald sie möglich ist. Deshalb sind Quarks und Gluonen nicht direkt einzeln 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 nicht konstant. Stattdessen hängt  $\alpha_s$  vom sogenannten Impulsübertragsquadrat  $Q^2$  zwischen zwei Teilchen ab. Abbildung ?? [BILD] zeigt den Verlauf von  $\alpha_s$  in Abhängigkeit von  $Q^2$ . 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*  $\alpha_s$ . 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 entsteht kurz nach der Kollision von zwei hochenergetischen Atomkernen. Quarks und Gluonen, die aus diesem Medium kommen, müssen, während der soge-

nannten Hadronisierung, wieder zu Hadronen werden. Diese Hadronen können zerfallen, insofern sie keine stabilen Teilchen sind. 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

Wie im vorherigen Abschnitt beschrieben, ist zur Erzeugung eines heißen und dichten Zustands die Kollision zweier Atomkerne nötig. Solche Kollisionen werden in sogenannten Colliderexperimenten durchgeführt. Ein solches Colliderexperiment wird am CERN betrieben. Das CERN ist Europas größtes Institut zur Untersuchung im Bereich der (Elementar)Teilchenphysik. Am CERN befindet sich das nach aktuellem Stand größte Colliderexperiment weltweit. Um Kerne und andere Teilchen zum Kollidieren zu bringen müssen diese zunächst beschleunigt werden. Dies geschieht in mehreren sogenannten Beschleunigerringen. Der größte Beschleunigerring ist der LHC, in welchem die beschleunigten Teile kollidieren. Die Kollisionen werden an vier Punkten im LHC provoziert. An allen vier Stellen befinden sich umfangreiche Detektorkomplexe, wie etwa der ALICE Detektor. Im folgenden Abschnitt wird das ALICE Experiment genauer beschrieben.

### 2.1 ALICE

Das ALICE Experiment wurde speziell zur Untersuchung des Quark-Gluonen-Plasmas gebaut.

### 2.2 elektromagnetische Kalorimeter EMCal

Das elektromagnetische Kalorimeter, kurz EMCal, liefert die Orts- und Energiemessungen, die in dieser Arbeit verwendet werden.

## 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