Bachelorarbeit

Korrelierter Untergrund von Pionen für die Messung von ω-Mesonen mit dem ALICE-Experiment am LHC

Tim Buskasper

Westfälische Wilhelms-Universität Münster Institut für Kernphysik

25.09.2017

Erstgutachter: PD Dr. Christian Klein-Bösing Zweitgutachter: Apl. Prof. Dr. Alfons Khoukaz

Plagiatserklärung des Studierenden

Hiermit versichere ich, dass die vorliegende Arbeit über den korrelierten Untergrund von Pionen für die Messung von ω -Mesonen mit dem ALICE-Experiment am LHC selbstständig verfasst worden ist, dass keine anderen Quellen und Hilfsmittel als die angegebenen benutzt worden sind und dass die Stellen der Arbeit, die anderen Werken – auch elektronischen Medien – dem Wortlaut oder Sinn nach entnommen wurden, auf jeden Fall unter Angabe der Quelle als Entlehnung kenntlich gemacht worden sind.

(Datum, Unterschrift)

Ich erkläre mich mit einem Abgleich der Arbeit mit anderen Texten zwecks Auffindung von Übereinstimmungen sowie mit einer zu diesem Zweck vorzunehmenden Speicherung der Arbeit in einer Datenbank einverstanden.

(Datum, Unterschrift)

Abstract

Die Bachelorarbeit Korrelierter Untergrund von Pionen für die Messung von ω -Mesonen mit dem ALICE-Experiment am LHC dient einer Verbesserung der Rekonstruktion des ω -Mesons. Dies kann nur gelingen, wenn der Hintergrund, der bei der Rekonstruktion entsteht, besser verstanden wird. Da davon auszugehen ist, dass neben dem Drei-Pionen-Zerfall ($\omega \to \pi^0 \pi^- \pi^+$) des ω -Mesons, über welchen dieses Meson rekonstruiert wird, weitere relevante Zerfälle stattfinden, spricht man von einem korrelierten Untergrund von Pionen. Eine weitere Korrelation im Hintergrund ist durch die Kinematik der produzierten Teilchen denkbar, welche durch Jets gegeben ist.

Diese beiden Möglichkeiten sind die Arten von Korrelationen, die in dieser Bachelorarbeit untersucht werden.

Dafür werden Proton-Proton-Kollisionen bei einer Schwerpunktsenergie von $\sqrt{s} = 7 \,\text{GeV}$ simuliert.

Die Begriffe Hintergrund, Untergrund und Background werden synonym verwendet.

Diese Arbeit umfasst 60 Seiten.

Danksagung

An dieser Stelle möchte ich mich bei einigen Leuten bedanken, die mir die Einarbeitung und die Arbeit vereinfacht bzw. anregende Ideen beigetragen haben. Zunächst möchte ich mich bei PD Dr. Christian Klein-Bösing dafür bedanken, dass ich in dieser Arbeitsgruppe meine Bachelorarbeit schreiben durfte und dass er sich Zeit genommen hat, wenn ich um Rat gefragt habe. Ebenso möchte ich Apl. Prof. Dr. Khoukaz dafür danken, dass er sich bereit erklärt hat die Zweitkorrektur dieser Arbeit zu übernehmen.

Zusätzlich will ich Hendrik und Florian für die Hilfe bei der Einarbeitung und der Unterstützung bei Fragen danken. Dies hat mir an einigen Stellen sehr geholfen. Eine weitere große Hilfe bei Schwierigkeiten in der Programmierung war Axel, den ich ebenso zu jeder Zeit stören konnte, um Fragen zu stellen. Zudem danke ich Nico, Alexander und Fred für die anregenden Gespräche und schließlich der gesamten Arbeitsgruppe für ein mehr als angenehmes Arbeitsklima.

Außerdem danke ich Alexander und meinem Vater für das Korrekturlesen dieser Bachelorarbeit.

Zu guter Letzt danke ich meiner gesamten Familie für die durchgehende Unterstützung.

Inhaltsverzeichnis

1.	Einl	eitung	1
2.	The	oretische Grundlagen	3
	2.1.	Einheiten	3
	2.2.	Aufbau der Materie	4
		2.2.1. Mesonen	5
		2.2.2. Massen und Zerfallskanäle der relevanten Mesonen	7
	2.3.	Proton-Proton-Kollisionen	8
	2.4.	Relativistische Kinematik	9
		2.4.1. Impulse der entstehenden Teilchen	10
		2.4.2. Vierer-Vektoren	11
3.	Verv	wendete Software, Methoden und das Experiment	13
	3.1.	ALICE-Experiment	13
	3.2.	Pythia	13
	3.3.	Invariante Masse und invariante Massendiagramme	14
	3.4.	Event Mixing	15
	3.5.	Jet-Überprüfung	16
4.	Ana	lyse	19
	4.1.	Allgemeine Analyse	19
		4.1.1. Optimale Stelle zur Skalierung	21
	4.2.	Korrelationen auf Grundlage von Zerfällen	29
		4.2.1. Einschalten von η -Zerfällen	31
		4.2.2. Einschalten von K_S^0 -Zerfällen	33
		4.2.3. Einschalten von ρ -Zerfällen	35
		4.2.4. Einschalten von η' -Zerfällen	40
	4.3.	Korrelationen auf Grundlage von Jet-Zugehörigkeit	42
5.	Disk	kussion der Ergebnisse und Ausblick	47
	5.1.	Diskussion und Zusammenfassung der Ergebnisse	47
		5.1.1. Allgemeine Analyse	47
		5.1.2. Korrelationen auf Grundlage von Zerfällen	48
		5.1.3. Korrelationen auf Grundlage von Jet-Zugehörigkeit $\ .\ .$	49
	5.2.	Ausblick	50

Α.	Anhang	53
	A.1. Abbildungen	53

Akronymverzeichnis

ALICE	A Large Ion Collider Experiment
BG	Background
CERN	Conseil Européen pour la Recherche Nucléaire
LHC	Large Hadron Collider
SGBG	Signal+Background

1. Einleitung

Um hochenergetische Kollisionen besser verstehen zu können, ist es notwendig die entstehenden Teilchen bestmöglich zu rekonstruieren. Das behandelte ω -Meson hat beispielsweise lediglich eine Lebensdauer von 7,8 · 10⁻²³ s (vgl. [1, S. 240]). Die genaue Zahl der auftretenden ω -Mesonen in einem Event ist dementsprechend aufgrund der kurzen Lebensdauer mit keinem Messgerät zu bestimmen. Somit muss diese Zahl über die Zerfallsprodukte bestimmt werden, wobei eine Überlagerung mit dem Hintergrund auftritt. Es ist folglich von außerordentlicher Bedeutung den Hintergrund bestmöglich darzustellen. Um das zu gewährleisten, muss dieser genau analysiert werden. Hier liegt der Schwerpunkt der Arbeit. Da weitere andere Teilchen in der Kollision entstehen, die ebenso wie das ω -Meson in Pionen zerfallen, gibt es im Hintergrund Korrelationen. Zudem sind weitere Korrelationen, wie solche aufgrund von Jets, denkbar. Findet man diese, kann man den Untergrund besser darstellen und folglich die Zahl von ω -Mesonen genauer bestimmen.

2. Theoretische Grundlagen

Zunächst werden an dieser Stelle einige theoretische Grundlagen aufbereitet, die für das weitere Verständnis notwendig sind. Hierbei wird darauf geachtet, dass lediglich solche näher erläutert werden, welche im weiteren Verlauf vonnöten sind.

2.1. Einheiten

Da es sich um eine Arbeit in der Kernphysik handelt, werden anstatt der SI-Einheiten Joule (J) und Kilogramm (kg) für die Energie (E) und Masse (m) das Elektronenvolt (eV) bzw. das Elektronenvolt durch die Lichtgeschwindigkeit zum Quadrat verwendet (eV/c²). Diese Einheit der Masse folgt aus der Äquivalenz von Energie und Masse

$$E = m \cdot c^2 . \tag{2.1}$$

Die Definition des Elektronenvolts ist die folgende:

$$1 \,\mathrm{eV} = 1,602 \cdot 10^{-19} \,\mathrm{J}$$
 (2.2)

Zudem wird die Einheit Elektronenvolt durch Lichtgeschwindigkeit (eV/c) für den Impuls (p) statt der SI-Einheit Newton mal Sekunde (N·s) verwendet.

Alle hier genutzten Einheiten sind in tabellarischer Form in Tab. 2.1 sichtbar. Es ist zu berücksichtigen, dass im Folgenden anstatt des Elektronenvolts Megaoder Gigaelektronenvolt (MeV bzw. GeV) verwendet werden, da entsprechende Größen einen derart hohen Wert aufweisen.

Zudem wird in dieser Arbeit, anders als in der Kernphysik üblich, die Lichtgeschwindigkeit **nicht** auf den Wert eins gesetzt.

 Tabelle 2.1.: Übersicht der verwendeten Einheiten im Gegensatz zu den üblichen SI-Einheiten

phys. Größe	SI-Einheit	verwendete Einheit		
Masse m	kg	eV/c^2		
Energie E	J	eV		
Impuls p	N· s	eV/c		

Wechselwirkung	koppelt an	Austauschteilchen					
stark	Farbe	8 Gluonen					
elektromagnetisch	elektrische Ladung	Photon					
schwach	schwache Ladung	W^{\pm}, Z^0					
Gravitation	Massen	Graviton(?)					

Tabelle 2.2.: Übersicht von Wechselwirkungen und zugehörigen Austauschteilchen (leicht verändert übernommen aus [2, S. 6f.]).

2.2. Aufbau der Materie

Atome bestehen aus einer Atomhülle und einem Atomkern. In der Hülle befinden sich die Elektronen und im Kern die Protonen und Neutronen, welche als Nukleonen zusammengefasst werden können. Diese weisen eine Substruktur auf, welche aus Quarks und Gluonen besteht [1, Kap. 1]. Die Gluonen sind die Austauschteilchen zwischen den Quarks und dienen folglich als Vektorbosonen der starken Wechselwirkung, welche eine der vier fundamentalen Kräfte darstellt. Diese sind der Vollständigkeit halber in Tabelle 2.2 aufgelistet.

Bei den Quarks unterscheidet man vom leichtestes zum schwersten Quark zwischen den folgenden sog. Quark-Flavours: up, down, strange, charm, bottom und top sowie den entsprechenden Antiquarks. Nachstehend werden diese Quarks vermehrt mit ihren Anfangsbuchstaben abgekürzt. Ebenso die Antiquarks, welche jedoch einen Strich über dem Buchstaben besitzen. So entspricht das u-Quark dem up-Quark, das ū-Quark dem Anti-up-Quark usw. Für ein besseres Verständnis der weiteren Bachelorarbeit sind lediglich Kenntnisse über u-, d- und s-Quark sowie den entsprechenden Antiquarks notwendig.

Protonen bestehen aus zwei up-Quarks und einem down-Quark. Neutronen hingegen aus einem up-Quark und zwei down-Quarks. Da up- und down-Quarks eine ähnliche Masse besitzen, folglich auch Protonen und Neutronen, und diese sich bezüglich der starken Wechselwirkung gleich verhalten, werden diese, wie bereits angedeutet, zu Nukleonen zusammengefasst. Quarks besitzen einen Spin von 1/2 und sind somit Fermionen. Dies gilt ebenso für die Nukleonen. Aufgrund des beschriebenen ähnlichen Verhaltens werden Proton und Neutron als Zustände des Nukleons aufgefasst und eine Quantenzahl zur Unterscheidung der Zustände eingeführt, der sogenannte Isospin *I*. Dieser wird behandelt wie die Drehimpulse zur Beschreibung der Elektronenzustände (vgl. [3, Kap. 5]). Das bedeutet, dass der Isospin *I* für beide Zustände den Wert 1/2 annimmt und sich lediglich die z-Komponente I_3 unterscheidet. Folglich ist dieses Konzept auf upund down-Quark anzuwenden. Die z-Komponente des up-Quarks beträgt +1/2 und die des down-Quarks -1/2.

Da weder Proton noch Neutron aus einem strange-Quark besteht, besitzt dieses keinen Isospin. Bei Zerfällen von Teilchen, die aus diesem Quark bestehen, ist

<u>_</u>				L / J L /		
Quark	I	I_3	S	Spin	elektr. Ladung Q	
up (u)	1/2	1/2	0	1/2	2/3	
down (d)	1/2	-1/2	0	1/2	-1/3	
strange(s)	0	0	-1	1/2	-1/3	
Anti-up (\bar{u})	1/2	-1/2	0	1/2	-2/3	
Anti-down (\bar{d})	1/2	1/2	0	1/2	1/3	
$\begin{tabular}{ l l l l l l l l l l l l l l l l l l l$	0	0	1	1/2	1/3	

Tabelle 2.3.: Übersicht und Eigenschaften der Quarks, welche im weiteren Verlauf von Bedeutung sind (Daten übernommen aus [1, S. 205] und [2, S. 110]).

jedoch ein merkwürdiges Verhalten sichtbar, weshalb eine Quantenzahl für dieses Quark eingeführt wird¹. Dies ist die Strangeness S, welche beim s-Quark den Wert -1 besitzt. Die Antiquarks des s-, u- und d-Quark unterscheiden sich im Vorzeichen der Strangeness bzw. in dem der z-Komponente des Isospins. Dies ist in Tabelle 2.3 übersichtlich dargestellt. Ergänzend ist dabei noch die elektrische Ladung Q aufgenommen worden, um zum Beispiel die Unterscheidbarkeit zwischen d- und \bar{u} -Quark zu verdeutlichen.

Die Teilchen, die aus Quarks bestehen und durch die starke Wechselwirkung zusammengehalten werden, sind die sogenannten **Hadronen**. Hierbei unterscheidet man die **Baryonen** und die **Mesonen**.

Baryonen (wie z. B. Protonen) bestehen aus drei Quarks und besitzen einen halbzahligen Spin. Sie sind folglich Fermionen. Die Baryonen werden im weiteren Verlauf dieser Arbeit keinen weiteren Einfluss nehmen, weshalb hierauf nicht weiter eingegangen wird.

Die **Mesonen** bestehen aus zwei Quarks und haben dementsprechend einen ganzzahligen Spin. Sie bestehen aus einem Quark-Antiquark-Paar, da das Konzept der *Farbladungen* zu berücksichtigen ist, welches besagt, dass das Hadron farbneutral sein muss. Die Mesonen werden im folgenden Unterabschnitt näher erläutert.

2.2.1. Mesonen

Man unterscheidet bei den Mesonen zwischen Vektormesonen und pseudoskalaren Mesonen.

2.2.1.1. Vektormesonen

Als Vektormesonen werden solche Mesonen bezeichnet, deren Gesamtdrehimpuls sich zu eins addiert. Das bedeutet, dass die Spins von Quark und Antiquark

¹ Für eine nähere Erläuterung des merkwürdigen Verhaltens bei einem Zerfall von Teilchen, welche aus dem s-Quark bestehen, sei auf [1, Kap. 9.2] verwiesen.

entweder beide up oder beide down sind. In den nachstehenden Beispielen wird angenommen, dass die Spins beide up sind.

Die leichtesten Vektormesonen stellen Kombinationen aus u-, \bar{u} -, d- und d-Quark dar, da diese, wie eingangs in den theoretischen Grundlagen erwähnt, die leichtesten Quarks sind. Drei mögliche Kombinationen werden durch das folgende Triplett

$$|\varrho^{+}\rangle = |\mathbf{u}^{\uparrow}\bar{\mathbf{d}}^{\uparrow}\rangle \qquad |\varrho^{-}\rangle = |\bar{\mathbf{u}}^{\uparrow}\mathbf{d}^{\uparrow}\rangle \qquad |\varrho^{0}\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}} \left\{ |\mathbf{u}^{\uparrow}\bar{\mathbf{u}}^{\uparrow}\rangle - |\mathbf{d}^{\uparrow}\bar{\mathbf{d}}^{\uparrow}\rangle \right\}$$
(2.3)

beschrieben, wobei der Vorfaktor von $|\varrho^0\rangle$ aus der Normierung folgt. Die Schreibweise entspricht dem in der Quantentheorie üblichen Dirac-Formalismus, welcher im folgenden zur Beschreibung der betrachteten Mesonen verwendet wird. Für weitere Details dieser Schreibweise sei auf [1, Kap. 8 und 15] und [4, Kap. 3] verwiesen.

Die letzte Möglichkeit, welche aus u-, \bar{u} -, d- und \bar{d} -Quark denkbar ist, bildet das sogenannte ω -Meson, welches den Hauptbestandteil dieser Arbeit ausmacht. Es handelt sich hierbei, analog zum $|\varrho^0\rangle$, um einen Mischzustand, welcher jedoch einen Singulettzustand darstellt. Der Aufbau dieses Mesons ist der folgende:

$$|\omega\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}} \left\{ |\mathbf{u}^{\uparrow} \bar{\mathbf{u}}^{\uparrow}\rangle + |\mathbf{d}^{\uparrow} \bar{\mathbf{d}}^{\uparrow}\rangle \right\} \,.$$

Bildet man zusätzliche Kombinationen mit dem s- bzw. s-Quark, so folgen vier weitere Quarkkombinationen, welche wie nachfolgend sichtbar

$$|\mathbf{K}^{*-}\rangle = |\mathbf{s}^{\uparrow}\bar{\mathbf{u}}^{\uparrow}\rangle \quad |\bar{\mathbf{K}}^{*0}\rangle = |\mathbf{s}^{\uparrow}\bar{\mathbf{d}}^{\uparrow}\rangle \quad |\mathbf{K}^{*+}\rangle = |\mathbf{u}^{\uparrow}\bar{\mathbf{s}}^{\uparrow}\rangle \quad |\mathbf{K}^{*0}\rangle = |\mathbf{d}^{\uparrow}\bar{\mathbf{s}}^{\uparrow}\rangle \tag{2.4}$$

aufgebaut sind. Diese hier aufgezeigten Vektormesonen sind in Abbildung 2.1 auf der linken Seite dargestellt. Zusätzlich ist dort das ϕ -Meson sichtbar, welches für diese Arbeit nicht weiter von Bedeutung ist und somit nicht näher erläutert wird.

Auf die Zerfälle und die Massen der dargelegten Vektormesonen wird in Abschnitt 2.2.2 näher eingegangen.

2.2.1.2. Pseudoskalare Mesonen

Neben den Vektormesonen gibt es die pseudoskalaren Mesonen, bei denen die Spins der beiden Quarks entgegengesetzt sind.

Die leichteste Gruppe eines solchen Paares bilden die Pionen, welche sich in die folgenden drei Arten unterteilen lassen

$$|\pi^+\rangle = |u\bar{d}\rangle \qquad |\pi^-\rangle = |\bar{u}d\rangle \qquad |\pi^0\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}} \left\{ |u\bar{u}\rangle - |d\bar{d}\rangle \right\}.$$
 (2.5)

Die Pionen besitzen zudem die geringste Masse aller Mesonen. Der Aufbau der pseudoskalaren Mesonen entspricht offensichtlich dem der Vektormesonen wie



Abbildung 2.1.: Übersicht relevanter Vektor- (links) sowie pseudoskalarer (rechts) Mesonen, aufgeteilt nach Strangeness S und z-Komponente des Isospins I_3 (entnommen aus [1, S. 236]).

im Vergleich von (2.5) mit (2.3) sichtbar wird. Die Spinrichtung der Quarks der Pionen aus (2.5) ist nicht explizit angegeben, da bereits eingangs erläutert worden ist, dass die Spins entgegengesetzte Richtungen aufweisen.

Zusätzliche pseudoskalare Mesonen sind die Kaonen, welche dieselbe Quarkstruktur wie solche aus (2.4) des Abschnittes 2.2.1.1 besitzen, wobei die Spins jeweils in entgegengesetzte Richtungen zeigen und die Bezeichnung der pseudoskalaren Kaonen ohne Stern erfolgt (vgl. Abbildung 2.1 rechte Seite).

Als letzte relevante Gruppe der pseudoskalaren Mesonen werden das η und η' -Meson betrachtet. Der Aufbau dieser ist der folgende:

$$|\eta\rangle \approx \frac{1}{\sqrt{6}} \Big\{ |\mathbf{u}^{\uparrow} \bar{\mathbf{u}}^{\downarrow}\rangle + |\mathbf{d}^{\uparrow} \bar{\mathbf{d}}^{\downarrow}\rangle - 2 \,|\mathbf{s}^{\uparrow} \bar{\mathbf{s}}^{\downarrow}\rangle \Big\}$$
(2.6)

$$|\eta'\rangle \approx \frac{1}{\sqrt{3}} \left\{ |\mathbf{u}^{\uparrow} \bar{\mathbf{u}}^{\downarrow}\rangle + |\mathbf{d}^{\uparrow} \bar{\mathbf{d}}^{\downarrow}\rangle + |\mathbf{s}^{\uparrow} \bar{\mathbf{s}}^{\downarrow}\rangle \right\} \,, \tag{2.7}$$

welcher aus [1, S. 237] entnommen worden ist. Die Vorfaktoren dienen wiederum der Normierung. Eine Übersicht der relevanten pseudoskalaren und Vektormesonen ist in Abbildung 2.1 dargestellt.

2.2.2. Massen und Zerfallskanäle der relevanten Mesonen

Eine Übersicht über die Massen, Lebensdauer und die jeweils am häufigsten (\geq 10%) auftretenden Zerfälle der zuvor dargestellten Mesonen bietet die Tabelle 2.4. Da das ω -Meson in dieser Arbeit eine außerordentliche Rolle spielt, ist für dieses Meson ein zusätzlicher Zerfall aufgeführt, welcher eine Wahrscheinlichkeit von unter 10% aufweist. Zudem gilt zu berücksichtigen, dass es um den korrelierten Untergrund von Pionen geht und folglich die Aufführung der Zerfallskanäle der Pionen überflüssig ist.

Auf die Daten dieser Tabelle wird in der Analyse (Abschn. 4) vermehrt verwiesen bzw. diese aufgegriffen.

 K^0 und \bar{K}^0 lassen sich ineinander umwandeln. Deshalb werden Linearkombinationen dieser beiden Mesonen eingeführt, welche aufgrund der Länge der Lebensdauer als K_S bzw. K_L (short und long) bezeichnet werden. Nähere Erläuterungen zu dem Zerfall des neutralen Kaons sind [1, Kap. 15.4] zu entnehmen.

Tabelle 2.4.: Übersicht der Massen, Lebenszeiten und Zerfallskanäle der relevanten Mesonen. Die Masse und Zerfälle von ω -, η -, ϱ - und η' -Meson sowie die Masse der Pionen sind [5] entnommen worden. Diese Informationen für die Kaonen stammen aus [6]. Die Daten zur Lebensdauer sind aus [1, S. 240] entnommen.

Meson	$m [MeV/c^2]$	${\bf Lebens dauer [s]}$	Zerfallskanal	${f Wahrscheinlichkeit}[\%]$
ω	$782,65 \pm 0,12$	$7, 8 \cdot 10^{-23}$	$\pi^{+} \pi^{-} \pi^{0}$	$89,2 \pm 0,7$
			$\pi^0 \gamma$	$8,28 \pm 0,28$
π^{\pm}	$139,57018 \pm 0,00035$	$2, 6 \cdot 10^{-8}$		
π^0	$134,9766 \pm 0,0006$	$8, 5 \cdot 10^{-17}$		
K^{\pm}	$493,677\pm 0,016$	$1,2\cdot 10^{-8}$	$\mu^{\pm} {(-) \atop \nu}_{\mu}$	$63,56\pm0,11$
			$\pi^{\pm} \pi^{0}$	$20,67 \pm 0,08$
K_S^0	$497,611 \pm 0,013$	$8,9 \cdot 10^{-11}$	$\pi^+ \pi^-$	$69,20 \pm 0,05$
			$\pi^0 \pi^0$	$30,69 \pm 0,05$
K_L^0		$5, 1 \cdot 10^{-8}$	$\pi^+ \pi^- \pi^0$	$12,54 \pm 0,05$
			$\pi^{0} \pi^{0} \pi^{0}$	$19,52 \pm 0,12$
			$\pi^{\pm} e^{\mp \stackrel{(-)}{\nu}_{e}}$	$40,55\pm0,11$
			$\pi^{\pm} \mu^{\mp} {(-) \atop \nu}_{\mu}$	$27,04\pm0,07$
η	$547,862 \pm 0,017$	$5, 5 \cdot 10^{-19}$	2γ	$39,41 \pm 0,20$
			$\pi^{0} \pi^{0} \pi^{0}$	$32,68 \pm 0,23$
			$\pi^+ \pi^- \pi^0$	$22,92 \pm 0,28$
ϱ^0	$775, 26 \pm 0, 25$	$4, 3 \cdot 10^{-24}$	$\pi^+ \pi^-$	~ 100
ϱ^{\pm}			$\pi^{\pm} \pi^{0}$	~ 100
$K^{*\pm}$	$891, 66 \pm 0, 26$ (wenn aus Hadronenzerf.)	$1, 3 \cdot 10^{-23}$	Κπ	~ 100
$K^{*\pm}$	$895, 5 \pm 0, 8$ (wenn aus τ -Zerfall)			
K^{*0}	$895, 81 \pm 0, 19$			
η'	$957,78 \pm 0,06$	$3, 3 \cdot 10^{-21}$	$\pi^+ \pi^- \eta$	$42,9 \pm 0,7$
			$\varrho^0 \gamma$	$29, 1 \pm 0, 5$
			$\pi^0 \pi^0 \eta$	$22, 3 \pm 0, 8$

2.3. Proton-Proton-Kollisionen

In dieser Bachelorarbeit werden Proton-Proton-Kollisionen simuliert. Aus diesem Grund wird an dieser Stelle auf die Grundlage solcher Kollisionen eingegangen. Da es bei dieser Art von Kollisionen im ALICE-Experiment lediglich zu inelastischen Streuung kommt, wird die elastische Streuung nicht näher erläutert. Eine entsprechende Darstellung der Kollision ist in Abbildung 2.2 sichtbar. Hierbei bestehen die Strahlen a und b aus Protonen und die Bündel c und d stehen exemplarisch für entstehende Teilchen wie zum Beispiel Mesonen, welche wiederum weiter zerfallen können. Dies ist in Abbildung 2.2 jedoch nicht explizit dargestellt.

Erklärbar wird dies dadurch, dass die Gesamtenergie der Protonen so hoch



Abbildung 2.2.: Darstellung kollidierender Teilchenbündel bei einer inelastischen Streuung (entnommen aus [1, S. 44]).

ist, dass diese zur Produktion von neuen Teilchen ausreicht². Statt von einer Gesamtenergie wird von der Schwerpunktsenergie \sqrt{s} , welche auch invariante Masse genannt wird und als

$$\sqrt{s} = \sqrt{\sum_{i=1}^{n} (P_i)^2}$$
 (2.8)

definiert ist, gesprochen.

Dabei sind P_i Vierer-Impuls-Vektoren, d.h. Kombinationen aus der Energie und dem Dreier-Impuls-Vektor. Der Laufindex *i* bezieht sich auf eines der *n* beteiligten Teilchen, welche notwendig sind, um die Schwerpunktsenergie auszurechnen. In diesem Fall ist *n* zwei, da die Kollision zweier Protonen betrachtet wird.

Eine genauere Erklärung zu Vierer-Vektoren wird in Kapitel 2.4.2 geliefert. Auf die invariante Masse bzw. Schwerpunktsenergien wird genauer in Kapitel 3.3 eingegangen.

An dieser Stelle sei bereits darauf hingewiesen, dass im folgenden der Begriff Schwerpunktsenergie verwendet wird, um die Ausgangsbedingungen des Experiments, also die Schwerpunktsenergie der kollidierenden Protonen, zu beschreiben. Werden Zerfallsprodukte betrachtet bzw. versucht zu rekonstruieren, wird der Begriff invariante Masse benutzt und statt \sqrt{s} wird M als Zeichen dieser Masse verwendet.

2.4. Relativistische Kinematik

Da die Protonen kurz vor der Kollision bis auf nahezu Lichtgeschwindigkeit beschleunigt werden, ist es offensichtlich, dass die Protonen relativistisch behandelt werden müssen. Somit gelten für die Größen wie den Impuls p und die kinetische Energie E die Formeln

$$\boldsymbol{p} = \gamma m \boldsymbol{v} \tag{2.9}$$

$$E = \gamma m c^2 , \qquad (2.10)$$

 $^{^{2}}$ vgl. [1, Kap. 4.1]



Abbildung 2.3.: Graphische Darstellung der Aufteilung vom Impuls p in einen transversalen p_T und einen longitudinalen p_L Anteil mit eingezeichneter Strahlachse (leicht verändert aus [7, Vorlesung 2]).

wobei

$$\gamma = \frac{1}{\sqrt{1 - v^2/c^2}}$$
(2.11)

gilt. Dabei beschreibt v die Geschwindigkeit. Aus den Gleichungen (2.9) und (2.10) lässt sich die relativistische Energie-Impuls-Beziehung

$$E = \sqrt{\mathbf{p}^2 c^2 + m^2 c^4} \tag{2.12}$$

herleiten. Im folgenden wird daran festgehalten, dass Dreier-Vektoren, im Gegensatz zu Beträgen von Dreier-Vektoren, fett gedruckt werden.

Für nähere Informationen zur Herleitung dieser Formeln sei auf die Fachliteratur wie zum Beispiel [8] verwiesen.

2.4.1. Impulse der entstehenden Teilchen

Um die Impulse der Teilchen, die aus der Kollision hervorgehen, besser beschreiben zu können, wird der Impuls p in einen transversalen p_T und einen longitudinalen p_L Anteil aufgeteilt. Anschaulich wird dies in Abbildung 2.3. In den folgenden Abschnitten ist vor allem der transversale Impuls von Bedeutung, nicht aber der longitudinale. Der transversale Impuls, welcher wie folgt definiert ist

$$p_T = p \cdot \sin(\vartheta) , \qquad (2.13)$$

beschreibt eine Größe, die unter Lorentztransformation in Strahlrichtung invariant ist. Dies gilt für die longitudinale Komponente nicht (vgl. [9]). Da sich der longitudinale Impuls p_L zudem **nicht** additiv unter Lorentztransformation verhält, wird eine neue Größe eingeführt, die sogenannte Rapidität

$$y = \frac{1}{2} \cdot \ln\left(\frac{E + cp_L}{E - cp_L}\right).$$
(2.14)

Da sich diese Größe jedoch schlecht messen lässt, wird die sogenannte Pseudorapidität η eingeführt, welche wie folgt definiert ist

$$\eta = \frac{1}{2} \cdot \ln\left(\frac{p + p_L}{p - p_L}\right) = -\ln(\tan(\vartheta/2)) . \qquad (2.15)$$

Folglich ist zur Bestimmung der Pseudorapidität lediglich der Winkel zur Strahlachse ϑ zu messen. Die Pseudorapidität ist ebenso wie die Rapidität unter Lorentztransformation additiv.

2.4.2. Vierer-Vektoren

Wie in der Relativitätstheorie üblich, wird im folgenden statt Dreier-Vektoren, d.h. Vektoren aus drei Komponenten, das Konzept der Vierer-Vektoren verwendet. Beispielhaft wird an dieser Stelle der Ortsvektor aufgeführt, welcher wie folgt definiert wird

$$x^{\mu} = \begin{pmatrix} ct \\ x \\ y \\ z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} x^{0} \\ \boldsymbol{x} \end{pmatrix} .$$
 (2.16)

Hierbei gilt $x^0 = ct$ und folglich stellt x den Ortsvektor als Dreier-Vektor dar. Es sei an dieser Stelle angemerkt, dass das hochgestellte μ andeutet, dass es sich um einen kontravarianten Vierer-Vektor handelt. Kovariante Vektoren haben die folgende Form

$$x_{\mu} = \begin{pmatrix} ct \\ -x \\ -y \\ -z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} x^{0} \\ -\boldsymbol{x} \end{pmatrix} . \qquad (2.17)$$

Die Bedeutung von kontravarianten und kovarianten Vektoren soll an dieser Stelle nicht weiter ausgeführt werden, da es für den weiteren Verlauf irrelevant ist³.

Als Bedingung wird an die Vierer-Vektoren gestellt, dass sich das Längenquadrat bei einer Transformation von einem Inertialsystem in ein anderes nicht ändert, da in der Relativitätstheorie gefordert wird, dass die Vakuumlichtgeschwindigkeit konstant ist sowie unabhängig von der Geschwindigkeit des jeweiligen Inertialsystems (vgl. [8, Kap. 1.4]). Somit muss für das Längenquadrat jedes Vierer-Vektors

$$|z|^{2} = z^{\mu} z_{\mu} = (z^{0})^{2} - \boldsymbol{z}^{2} \stackrel{!}{=} (\bar{z}^{0})^{2} - \bar{\boldsymbol{z}}^{2} = \bar{z}^{\mu} \bar{z}_{\mu} = |\bar{z}|^{2}$$
(2.18)

gelten, wobei z und \bar{z} z.B. die Lichtausbreitung, in zwei sich verschieden bewegenden Inertialsystemen darstellen.

Größen, die in allen Inertialsystemen den gleichen Wert annehmen bzw. deren Wert unabhängig von dem Inertialsystem ist, werden lorentzinvariant genannt.

 $^{^3 \}mathrm{vgl.}$ für nähere Erläuterungen mit [8, Kap. 2.1]

3. Verwendete Software, Methoden und das Experiment

3.1. ALICE-Experiment

Da diese Arbeit den Namen Korrelierter Untergrund von Pionen für die Messung von ω -Mesonen mit dem ALICE-Experiment am LHC trägt, soll in wenigen Sätzen erklärt werden, was das ALICE-Experiment ist. In diesem Experiment werden drei Arten von Kollisionen untersucht. Diese sind Bleikern-Bleikern-Kollisionen, Proton-Proton-Kollisionen und Proton-Bleikern-Kollision. Dies dient der Frage nach den Ereignissen kurz nach dem Urknall bzw. der Untersuchung des Quark-Gluon-Plasmas [10], worauf aufgrund fehlender zukünftiger Relevanz in dieser Arbeit nicht eingegangen, sondern auf Fachliteratur verwiesen wird.

3.2. Pythia

Da Kollisionen (Events) im Analyseteil (Abschnitt 4) simuliert werden, wird an dieser Stelle auf das Programm und die vorgenommenen Einstellungen eingegangen, mit dem diese Simulationen betrieben worden sind.

Pythia ist ein Eventgenerator, in dem Kollisionen simuliert und die entstehenden Teilchen mit jeglichen Informationen ausgegeben werden können. Es funktioniert folglich wie ein idealer Detektor, welcher alle Teilchen detektiert und über diese die vollständigen Informationen wie zum Beispiel Impuls, Energie usw. enthält. Dies gelingt über die Implementierung von physikalischen Erkenntnissen bzw. Gesetzmäßigkeiten.

Ein Vorteil, welcher ein solcher Generator bietet und in dieser Bachelorarbeit ausgiebig genutzt wird, ist, dass einzelne Zerfälle ausgeschaltet werden können und somit in der Betrachtung des Events nicht beachtet werden. Dies bietet eine Vielzahl von Möglichkeiten für den Nutzer, um aufgestellte Thesen zu untersuchen.

In dem Analyseteil sind lediglich Proton-Proton-Kollisionen bei einer Schwerpunktsenergie von sieben TeV simuliert worden. Für die Erstellung aller Abbildungen sind jeweils eine Millionen Events generiert worden.

Für nähere Erklärungen zu der Funktionsweise von Pythia sei auf [11] verwiesen.

3.3. Invariante Masse und invariante Massendiagramme

Zunächst wird ein Vierer-Vektor bzw. der Vierer-Impuls eingeführt, welcher aus der Energie E in nullten Komponente und den drei Komponenten des relativistischen Impulses p besteht, folglich wie nachstehend (beispielhaft als kontravarianter Vektor) definiert ist

$$p^{\mu} = \begin{pmatrix} \frac{E}{c} \\ p_{x} \\ p_{y} \\ p_{z} \end{pmatrix} .$$
(3.1)

Da es sich hierbei um einen Vierer-Vektor handelt/handeln soll, muss die Bedingung aus Abschnitt 2.4.2 gelten und der Betrag dieses Vektors in allen Inertialsystemen gleich sein. Die Bedeutung des Betrags wird offensichtlich, wenn dieser ausgeschrieben wird. Hieraus folgt bei quadratischer Betrachtung

$$|P|^2 = p^{\mu} p_{\mu} = E^2 / c^2 - \boldsymbol{p}^2 . \qquad (3.2)$$

Vergleicht man dies mit der quadrierten, umgestellten relativistischen Energie-Impuls Beziehung (vgl. Gleichung (2.12))

$$E^2 - \mathbf{p}c^2 = m^2 c^4 = M^2 , \qquad (3.3)$$

fällt die Übereinstimmung auf. Die Norm |P| stellt folglich die invariante Masse M dar (vgl. [12]).

Dies wird genutzt, um Teilchen über die Zerfälle zu rekonstruieren. Bei dem Drei-Pionen-Zerfall des ω -Mesons beispielsweise ergibt die Norm der Summe der Vierer-Impuls-Vektoren von π^0 , π^- und π^+ aus diesem Zerfall $M_{\pi^0,\pi^-\pi^+} = (782, 65 \pm 0, 12) \text{ MeV/c}^2$.

Da nicht immer bekannt ist aus welchem Zerfall ein detektiertes Pion kommt (vor allem bei Pionen aus dem Zerfall neutraler Mesonen), wird die invariante Masse von allen Drei-Pionen-Kombinationen aus einem π^0 , einem π^- und einem π^+ , die im Event auftreten, berechnet. Diese Kombinationen bestehen lediglich aus einem π^0 , einem π^- und einem π^+ , da dies der Zerfallskanal des ω -Mesons ist. Es entsteht ein Peak an der Stelle der Masse des zu rekonstruierenden ω -Mesons, da die Wahrscheinlichkeit für eine signifikante Häufigkeit einer bestimmten invarianten Masse durch zusammenhangslose, zufällige Pionen geringer ist, als eine Anhäufung an der Stelle des ω -Mesons. Dies ist damit zu erklären, dass die Bildung der invarianten Masse von π^0 , π^- und π^+ , die aus einem Zerfall dieses Mesons stammen, in guter Näherung¹ immer zu dem exakt gleichen Wert der

¹Es entsteht kein δ -förmiger Peak, sondern ein Peak endlicher Breite. Somit besitzt die Masse des ω -Mesons eine Unsicherheit.

Masse führt, nämlich der des ω -Mesons.

Bei dieser Methode steht somit die invariante Masse an der x-Achse und die Häufigkeit (genauer genommen die, auf die Binbreite gemittelte, Häufigkeit) an der y-Achse. Die entstehenden Diagramme sind sogenannte **invariante Mas**sendiagramme.

Eine weitere Möglichkeit, die in dieser Arbeit verwendet wird, ist den transversalen Impuls p_T an die y-Achse zu schreiben. Dies geschieht, um zu sehen, ab welchem transversalen Impuls der Peak des zu rekonstruierenden Mesons sichtbar wird.

Um ein sichtbares Beispiel für ein invariantes Massendiagramm zu erhalten, sei für das bessere Verständnis an dieser Stelle vorweg auf Abbildung 4.1 verwiesen.

3.4. Event Mixing

Bei den Kombinationen von drei Pionen werden auch eine Vielzahl von Kombinationen durchlaufen, welche nicht aus dem gleichen Zerfall stammen bzw. nicht aus dem ω -Meson zerfallen sind. Dementsprechend gibt es neben einem Peak an der Stelle der Masse des rekonstruierten Mesons zusätzlich eine Vielzahl von Einträgen in der direkten Umgebung und an jeglichen anderen Stellen auf der x-Achse, an denen der abgebildete Massenwert zumindest der kleinstmöglichen Masse der Kombination von π^+ , π^- und π^0 entspricht.

Diese Einträge, welche nicht aus der Rekonstruktion eines Mesons stammen, werden Hintergrund bzw. Untergrund genannt. Es ist zudem denkbar, dass eine Kombination aus Pionen aus verschiedenen Zerfällen zufällig eine gleiche invariante Masse wie die des ω -Mesons besitzt. Um folglich die tatsächliche Anzahl an Mesonen zu bestimmen, ist es notwendig den Hintergrund bestmöglich darzustellen. Hierfür wird das sog. **Event Mixing** eingeführt.

Hierbei werden Kombinationen von drei Pionen gebildet, welche nicht aus demselben Event stammen. Es handelt sich bei einer solchen Dreier-Kombination wiederum um ein π^0 , ein π^- und ein π^+ . Folglich sind vier Kombinationen denkbar, bei denen mindestens eines der Pionen nicht aus demselben Event wie die anderen stammt.

Als erste Möglichkeit werden die Pionen aus verschiedenen Events genommen, d.h. π^0 , π^- und π^+ stammen alle aus unterschiedlichen Events, und es wird wiederum ein invariantes Massendiagramm unter dieser Voraussetzung angefertigt. Die anderen drei Möglichkeiten bestehen darin, dass zwei der drei Pionen aus demselben Event stammen. Das bedeutet, dass zum Beispiel das π^- und das π^+ der Dreier-Kombinationen aus dem gleichen Event sind und das π^0 aus einem anderen Event stammt.

Es ist sichtbar, dass es bei diesen drei Möglichkeiten zu Korrelationen kommen kann/kommt, da zwei Pionen aus demselben Event stammen. Diese zu untersuchen, ist die Hauptaufgabe der Arbeit. Bei der Möglichkeit, in welcher alle Pionen aus verschiedenen Events stammen, sind Korrelationen logischerweise ausgeschlossen.

Um die Erklärung besser verstehen zu können, ist es sinnvoll an dieser Stelle Abbildung 4.2 zu betrachten, als Beispiel für ein invariantes Massendiagramm des Event Mixings.

3.5. Jet-Überprüfung

Jets sind vereinfacht beschrieben eine Vielzahl von Teilchen², welche nach einer Kollision in Kegelform in eine gewisse Richtung fliegen. Um zu prüfen, ob zwei Teilchen demselben Jet angehören wird die Größe R eingeführt, welche wie folgt definiert wird

$$R = \sqrt{(\eta_1 - \eta_2)^2 + (\phi_1 - \phi_2)^2} , \qquad (3.4)$$

wobei die Indizes für das jeweilige Teilchen, also Teilchen 1 und 2, der untersuchenden beiden Teilchen stehen. Dabei beschreibt ϕ den Azimutwinkel des jeweiligen Teilchens. Da das Quadrat aus der Differenz gebildet wird, ist hierbei egal welches als Teilchen 1 bzw. 2 bezeichnet wird.

Aus der Größe R lassen sich die folgenden Schlussfolgerungen ziehen:

 $R < 1 \Rightarrow$ Teilchen kommen aus einem Jet $R > 1 \Rightarrow$ Teilchen kommen nicht aus einem Jet $R = 1 \Rightarrow$ keine genaue Aussage möglich .

In dem Kapitel 4.3 werden zwei Pionen aus einem Event verglichen und untersucht, ob diese zwei aus demselben Jet stammen. Dies wird mit allen denkbaren Zweier-Kombinationen aus π^+ , π^- und π^0 gemacht, wobei die Pionen verschiedener Art sein müssen. Da für die hier angefertigten invarianten Massendiagramme drei Pionenarten betrachtet werden müssen, wird zusätzlich nach der Bildung einer Zweier-Kombination überprüft, ob sich die dritte Art von Pion aus demselben Event ebenso in demselben Jet befindet oder nicht. So ergeben sich fünf verschiedene Möglichkeiten, welche nachstehend dargestellt sind:

- 1. $\pi^+ \pi^-$ aus gleichem Jet
- 2. $\pi^0 \pi^-$ aus gleichem Jet
- 3. $\pi^+ \pi^0$ aus gleichem Jet
- 4. alle drei Pionen aus gleichem Jet
- 5. alle drei Pionen aus verschiedenen Jets .

Zusätzlich denkbar ist der Fall, dass sich zwei Jets teilweise überlagern. Folglich sind drei weitere Varianten denkbar:

 $^{^2\}mathrm{d.h.}$ ein Teilchenbündel

- 6. π^+ und π^- sowie π^+ und π^0 aus gleichem Jet; nicht aber π^- und $\pi^0 \Rightarrow \pi^+$ in zwei Jets
- 7. π^- und π^+ sowie π^- und π^0 aus gleichem Jet; nicht aber π^+ und $\pi^0 \Rightarrow \pi^-$ in zwei Jets
- 8. π^0 und π^- so
wie π^0 und π^+ aus gleichem Jet; nicht aber π^- und π^+
 $\Rightarrow \pi^0$ in zwei Jets .

Die invarianten Massendiagramme der jeweiligen Kombination werden daraufhin dahingehend überprüft, ob sie verantwortlich für mögliche Korrelationen im Hintergrund des invarianten Massendiagramms zur Rekonstruktion des ω -Mesons sind.

4. Analyse

In diesem Kapitel, welches den Hauptteil der Bachelorarbeit ausmacht, wird versucht die Beschreibung des Hintergrunds zu verbessern, indem nach Korrelationen der Pionen beim Zerfall des ω -Mesons gesucht wird. Hierfür wird einerseits nach Korrelationen aufgrund von Zerfällen und in einem weiteren Abschnitt nach Korrelationen aufgrund von gleichen Jets gesucht.

Zunächst wird jedoch eine allgemeine, einführende Analyse des Hintergrunds vorgenommen, welche für beide Teile notwendig ist, um ein optimales Ergebnis zu garantieren.

Wenn in nachstehenden Abschnitten der Begriff invariantes Massendiagramm bzw. invariante Masse¹verwendet wird, bezieht sich dies auf den Fall, in welchem das ω -Meson rekonstruiert werden soll. Also solchem, in dem π^0 , π^- und π^+ aus demselben Event stammen.

Zwar stellen die Methoden des Event Mixings ebenso invariante Massendiagramme dar, jedoch wird bei einem Bezug auf diese explizit der Begriff des Event Mixings verwendet und in der Regel auf die zusätzliche Information, dass es sich um ein invariantes Massendiagramm handelt, verzichtet.

4.1. Allgemeine Analyse

Um den korrelierten Untergrund von Pionen für die Messung von ω -Mesonen untersuchen zu können, ist es zunächst notwendig, die möglichen Zerfälle dieses Mesons zu betrachten (vgl. Tabelle 2.4).

Da das ω -Meson zu $(89, 2 \pm 0, 7)$ % in drei Pionen $(\pi^+ \pi^- \pi^0)$ zerfällt², wird im Folgenden lediglich dieser Zerfall betrachtet. Fertigt man ein invariantes Massendiagramm aus diesen drei Pionenarten an, so ergibt sich die Abbildung 4.1. Die theoretischen Erläuterungen für diese Art von Diagrammen sind in Kapitel 3.3 dargelegt.

Anhand dieser Abbildung ist sowohl der Drei-Pionen-Zerfall des ω -³ als auch der des η -Mesons⁴ zu erkennen, da bei den jeweiligen Massen Peaks sichtbar werden. Für das ω -Meson fällt jedoch im Gegensatz zum η -Meson auf, dass die Häufigkeit der Einträge bei der Masse des ω erst für ein $p_T > 3 \text{ GeV/c}$ signifikant höher ist als die des Untergrunds. Das bedeutet, dass dieser Peak für ein kleines p_T vom

 $^{^{1}\}mathrm{betreffend}$ eines Diagramms bzw. einer Kurve, welche in ein
 Diagramm eingezeichnet ist $^{2}\mathrm{vgl.}$ [5]

 $^{{}^{3}}m_{\omega} = (782, 65 \pm 0, 12) \, \mathrm{MeV/c^{2}}$

 $^{{}^{4}}m_{\eta} = (547, 862 \pm 0, 017) \, \mathrm{MeV/c^{2}}$



Abbildung 4.1.: Invariantes Massendiagramm für die Drei-Pionen-Konstellation $\pi^+ \pi^- \pi^0$. Hierfür ist der transversale Impuls gegen die invariante Masse dieser drei Pionen aufgetragen. Es sind eine Millionen Events durchgeführt worden, um eine angemessene Statistik zu gewährleisten.

Hintergrund überlagert wird.

Um den Hintergrund angemessen darzustellen, werden invariante Massendiagramme angefertigt, in welchen π^+ , π^- und π^0 nicht bzw. nur teilweise aus dem gleichen Event stammen. Diese Methoden stellen das Event Mixing dar, welches in Abschnitt 3.4 ausgiebig behandelt worden ist.

An dieser Stelle wird lediglich das entsprechende Diagramm für den Fall, bei welchem das π^0 und das π^+ aus dem gleichen Event stammen und das π^- aus einem anderen Event ist, abgebildet. Dies ist in der Abbildung 4.2 dargestellt. Die anderen möglichen Fälle des Event Mixings⁵ sind im Anhang dargelegt (siehe Abb. A.1, A.2 und A.3), da sich die einzelnen Abbildungen stark ähneln.

Um die Darstellungen besser analysieren zu können, werden die zweidimensionalen Diagramme auf die x-Achse projiziert. Beispielhaft wird dies in diesem Abschnitt für die Abbildungen 4.1 und 4.2 in den Abbildungen 4.3 und 4.4 aufgezeigt. Für die weiteren möglichen Fälle des Event Mixings befinden sich die jeweiligen Ergebnisse wiederum im Anhang (vgl. Abb. A.4, A.5 und A.6).

Wie in der Kernphysik (bzw. beim Binning generell) üblich, wird die Häufigkeit der Eintragungen durch die Binbreite geteilt.

Außerdem ist es notwendig die Projektion des jeweiligen Event Mixings auf die Projektion des invarianten Massendiagramms zu skalieren, da bei diesem lediglich

 $^{^{5}}$ vgl. Abschnitt 3.4



Abbildung 4.2.: Invariantes Massendiagramm des Event Mixings für die Drei-Pionen-Konstellation $\pi^+ \pi^- \pi^0$. Hierbei stammen lediglich das π^0 und das π^+ aus dem gleichen Event. Es sind eine Millionen Events durchgeführt worden.

Pionen aus gleichen Events kombiniert werden. Im Gegensatz dazu werden beim Event Mixing entweder alle Pionen aus verschiedenen Events kombiniert oder es kommen zwei Pionen aus einem Event und das Dritte aus einem beliebigen anderen. Somit gibt es deutlich mehr Kombinationen und dementsprechend mehr Einträge, wodurch eine Skalierung notwendig wird.

4.1.1. Optimale Stelle zur Skalierung

Es ist somit zunächst herauszufinden, an welcher Stelle optimalerweise skaliert werden sollte. Hierzu wird ausgenutzt, dass es sich bei dieser Arbeit um Ergebnisse einer Simulation handelt und somit experimentell unmögliche Bedingungen geschaffen werden können. So ist es möglich lediglich Pionen in ein invariantes Massendiagramm einzutragen, welche mit Sicherheit aus dem Zerfall des ω -Mesons kommen. Das Ergebnis der Kombinationen, die möglich sind, wenn man ausschließlich Pionen, die aus dem ω -Zerfall und aus demselben Event stammen, in ein solches Diagramm einträgt, ist in Abbildung 4.5 sichtbar. Zudem ist diese in Abbildung 4.6 auf die x-Achse projiziert worden.

Es fällt in Abbildung 4.6 auf, dass bis zu der Masse des ω -Mesons ein Anstieg feststellbar ist und dieser rechts von dem Peak nicht fortgesetzt wird, sondern sich die Zahl der Einträge geteilt durch die Binbreite nahezu konstant verhält. Betrachtet man dagegen das invariante Massendiagramm, in welchem die drei Pionen aus demselben Event stammen (vgl. Abbildung 4.3), stellt man fest, dass



Abbildung 4.3.: Projektion des invarianten Massendiagramms, bei dem alle Pionen aus demselben Event stammen.



Abbildung 4.4.: Projektion des invarianten Massendiagramms des Event Mixings, bei dem π^0 und π^+ aus demselben Event sind.



Abbildung 4.5.: Invariantes Massendiagramm für die Drei-Pionen-Konstellation $\pi^+ \pi^- \pi^0$. Hierbei stammen diese Pionen **alle** aus dem Zerfall von ω -Mesonen. Es sind eine Millionen Events durchgeführt worden.



Abbildung 4.6.: Projektion auf die x-Achse des invarianten Massendiagramms, indem lediglich Pionen aus Zerfällen des ω -Mesons eingetragen sind.

es sowohl links als auch rechts des Peaks einen Anstieg gibt. Es ist demnach festzuhalten, dass der Anteil von Pionen aus dem Zerfall des ω -Mesons am Hintergrund in dem invarianten Massendiagramm aus Abbildung 4.3 mit zunehmender Masse rechts von dem Peak abnimmt. Aus diesem Grund erscheint es als wenig logisch die Skalierung weit entfernt von dem Peak, auf dessen rechten Seite vorzunehmen.

Zudem muss berücksichtigt werden, was die Aufgabe dieser Arbeit ist und zwar soll ein verbessertes Verständnis des Hintergrundes einer verbesserten Rekonstruktion des ω -Mesons dienen. Dementsprechend scheint es sinnvoll zu sein, die Skalierung möglichst nah an die Masse dieses Mesons zu setzen, um den Hintergrund möglichst gut in dessen Nähe zu beschreiben und eine gute Rekonstruktion zu gewährleisten.

In den folgenden Unterabschnitten werden die Abbildungen der Projektion des invarianten Massendiagramms und die vier Diagramme der Projektion des jeweiligen Event Mixings in einem Diagramm dargestellt und dabei an jeweils verschiedenen Stellen skaliert.

Außerdem wird die Projektion des invarianten Massendiagramms mit den drei Pionen aus demselben Event, als Signal+Background (SGBG) und der Hintergrund bzw. die jeweilige Form des Event Mixings als Background (BG) bezeichnet.

Zudem wird es für die jeweiligen Skalierungen ein Diagramm geben, in welchem die Projektion des invarianten Massendiagramms (SGBG) durch die jeweilige Form des Event Mixings (BG) geteilt wird, um die Güte der Beschreibung des Hintergrunds durch die jeweilige Projektion des Event Mixings bewerten zu können.

4.1.1.1. Skalierung bei $M_{\pi^0 \pi^+ \pi^-} = 0,75 \text{ GeV/c}^2$

Wie bereits angedeutet, ist es sinnvoll die Skalierung nahe der Masse des ω -Mesons vorzunehmen. Zunächst wird bei einer invarianten Masse $M_{\pi^0\pi^+\pi^-} = 0,75 \text{ GeV/c}^2$ skaliert. Trägt man die Projektionen der Abbildungen der vier Möglichkeiten des Event Mixings (Abb. 4.4, A.4, A.5 und A.6) bei einer Skalierung bei zuvor genannter Masse an die Projektion des invarianten Massendiagramms (Abbildung 4.3) mit diesem in ein Diagramm ein, ergibt sich Abbildung 4.7.

In dieser Abbildung wird deutlich, dass sich die verschiedenen Varianten des Event Mixings ähnlich verhalten und jene vor allem links des Peaks eine sehr gute Überstimmung mit dem Hintergrund liefern. Dieser wird nahezu überlagert. Ein entsprechendes Verhalten ist rechts nahe des Peaks sichtbar, jedoch scheint es, als würde der Hintergrund für größere Werte von $M_{\pi^0\pi^+\pi^-}$ überschätzt und alle Varianten des Event Mixings nähmen eine höhere Anzahl an Einträgen als der tatsächliche Hintergrund an.

Da die Betrachtung in einem solchen Diagramm für eine nähere bzw. bessere Einschätzung ungeeignet ist und das zuvor festgestellte Verhalten nur erahnt werden kann, wird die Projektion der invarianten Masse durch die jeweiligen



Abbildung 4.7.: Alle Projektionen bei einer Skalierung an der Stelle $M_{\pi^0 \pi^+ \pi^-} = 0,75 \text{ GeV}/c^2$ in einem Diagramm.

Projektionen des Event Mixings geteilt⁶.

Nach vorherigen Thesen ist zu erwarten, dass das Ergebnis des Verhältnisses zwar an jeder Stelle nahe eins ist, da der Hintergrund bereits sehr gut dargestellt wird, aber rechts von dem Peak ein kleinerer Wert als eins erreicht wird, da das SGBG einen niedrigerer Wert als die jeweiligen Projektionen (BG) annimmt.

Die entsprechende Darstellung ist in Abbildung 4.8 sichtbar. Zusätzlich ist hierbei eine Linie bei einem Wert von eins für SGBG/BG dargestellt, um anzudeuten, an welcher Stelle SGBG und BG identisch sind. Diese dient folglich lediglich der besseren Einschätzung der Güte der Darstellung des Hintergrundes durch das Event Mixing.

Es ist feststellbar, dass die zuvor aufgestellten Thesen richtig sind und links von dem Peak tatsächlich eine bessere Darstellung des Hintergrunds durch das Event Mixing gelingt. Zusätzlich ist zu erkennen, dass rechts des Peaks die Darstellung des Hintergrunds mit zunehmender Masse M schlechter wird. Dieses Verhalten ist möglicherweise erklärbar, wenn man wiederum Abbildung 4.6 betrachtet. Bei der Beschreibung dieser Abbildung ist bereits angedeutet worden, dass die Zahl der Pionen im Hintergrund aus ω -Zerfällen links vom Peak mit steigender Masse zunimmt und rechts vom Peak nahezu einen konstanten Wert annimmt. Zudem scheint die Steigung des Anstieges in Abbildung 4.6 abzunehmen, je stärker man sich dem Peak nähert. Nimmt man somit für die Projektion der invarianten Masse aus Abbildung 4.3 an, dass die Steigung um den Peak des ω -Mesons nahezu konstant ist, bedeutet dies, dass der prozentuale Anteil der Pionen aus Zerfällen von ω -Mesonen, die miteinander kombiniert werden, bei der invarianten Massenmethode geringer wird. Eine Skalierung links und nah

⁶SGBG/BG


Abbildung 4.8.: Projektion der invarianten Masse geteilt durch die jeweiligen Möglichkeiten des Event Mixings bei einer Skalierung an der Stelle $M_{\pi^0 \pi^+ \pi^-} = 0,75 \text{ GeV/c}^2.$

am Peak sorgt dementsprechend dafür, dass weiter links hiervon der prozentuale Anteil von Pionen aus ω -Mesonen am tatsächlichen Hintergrund größer ist und dieser Hintergrund somit einen größeren Wert als solcher durch das Event Mixing besitzt. Folglich ist der Wert aus Abbildung 4.8 links von dem Wert der Skalierung größer als eins. Analog hierzu ist es denkbar, dass rechts von dem Peak der niedrigere Anteil dazu führt, dass der Hintergrund überschätzt wird.

Das wichtigste Ergebnis der Abbildung 4.8 ist jedoch, dass es verschiedene Verläufe der vier Kurven gibt. Es ist zwar erwartbar, dass sich der Verlauf des Falles, bei dem alle Pionen aus verschiedenen Events sind, von den weiteren unterscheidet, da es bei den anderen drei Varianten zwei Pionen aus demselben Event und somit Korrelationen gibt, jedoch sind Unterscheidungen innerhalb dieser drei Arten des Event Mixings nicht zwangsläufig absehbar gewesen.

Dass die schlechteste Darstellung der Fall vollkommen unkorrelierter Pionen ist, ist somit durch die Korrelationen von Pionen, die den Hintergrund des invarianten Massendiagramms bei der Rekonstruktion des ω -Mesons darstellen, erklärbar. Korrelationen sind beispielsweise dadurch möglich, dass diese Pionen aus dem Zerfall anderer aus der Kollision entstehender Teilchen stammen.

Wie bereits angedeutet, ist es nicht erwartbar gewesen, dass sowohl links als auch rechts des Peaks die beste Darstellung dadurch gelingt, dass ein Event Mixing durchgeführt wird, in dem π^- und π^+ aus demselben Event stammen. Diese Variante eignet sich besser als solche bei denen π^0 und π^- bzw. π^0 und π^+ aus demselben Event sind.

Eine Unterscheidung zwischen diesen beiden Arten des Event Mixings⁷ scheint

⁷Hierbei sind π^0 und π^- bzw. π^0 und π^+ aus demselben Event gemeint.

es nicht zu geben. Diese Nichtunterscheidbarkeit und die Unterscheidbarkeit zu dem Fall π^- und π^+ aus demselben Event scheinen dafür zu sprechen, dass ein Zwei-Pionen-Zerfall im tatsächlichen Hintergrund stattfindet. Ein Mehr-Pionen-Zerfall erscheint unwahrscheinlich, weil eine solche Unterscheidung zwischen den Fällen π^- und π^+ aus derselben Kollision und π^0 und π^- bzw. π^0 und π^+ aus demselben Event hierbei vermutlich nicht so eindeutig sichtbar wäre. Ein Drei-Pionen-Zerfall in π^0 , π^- und π^- scheint zumindest nicht denkbar zu sein, da dieser alle diese drei Varianten in gleichem Maße beeinflussen würde. Es besteht jedoch die Möglichkeit, dass es aufgrund von Drei-Pionen-Zerfälle in drei π^0 Unterschiede gibt. Zunächst sei der Blick jedoch auf einen Zwei-Pionen-Zerfall gerichtet.

Eine weitere Annahme könnte an dieser Stelle sein, dass es sich lediglich um einen Zufall handelt und die Skalierung an einer ungünstigen Stelle stattfindet. Somit gilt es die Abbildung 4.8 für andere Skalierungen zu wiederholen und die zuvor gemachten Beobachtungen bzw. Thesen zu bestätigen, bevor dieses Verhalten näher untersucht wird.

4.1.1.2. Skalierung bei $M_{\pi^0 \pi^+ \pi^-} = 0,80 \text{ GeV/c}^2$

In diesem Unterabschnitt wird statt bei einer Masse von $M_{\pi^0 \pi^+ \pi^-} = 0,75 \text{ GeV/c}^2$ an der Stelle $M_{\pi^0 \pi^+ \pi^-} = 0,80 \text{ GeV/c}^2$ skaliert, um zu untersuchen, ob das zuvor beobachtete Ergebnis unabhängig von der Skalierung ist. Es handelt sich hierbei wiederum um eine Skalierung nahe des Peaks. Nur befindet sich diese, im Gegensatz zum vorherigen Unterabschnitt, rechts des Peaks. Zunächst werden die Projektionen der vier Abbildungen des Event Mixings und die Projektion der invarianten Masse in Analogie zu Abbildung 4.7 in einem Diagramm dargestellt. Das Ergebnis ist in Abbildung 4.9 sichtbar.

Bei genauer Betrachtung fällt auf, dass der Hintergrund mit zunehmender Masse wiederum überschätzt wird und sich die Projektionen der jeweiligen Event-Mixing-Methoden von der invarianten Masse entfernen. Zudem ist sichtbar, dass links des Peaks mit abnehmender Masse der Hintergrund unterschätzt wird.

Eine bessere Übersichtlichkeit bietet wiederum SGBG geteilt durch den jeweiligen BG (vgl. Abbildung 4.8). Ein solches Diagramm für die Skalierung bei $M_{\pi^0\pi^+\pi^-} = 0,80 \text{ GeV/c}^2$ ist in Abbildung 4.10 dargestellt. Die wichtigsten zuvor aufgestellten Thesen, die an dieser Stelle untersucht werden sollen, waren, dass sich die Variante π^- und π^+ aus demselben Event von den Varianten π^0 u. $\pi^$ bzw. π^0 u. π^+ aus demselben Event unterscheidet sowie, dass ein Event Mixing, bei dem alle Pionen aus verschiedenen Events stammen, die schlechteste Darstellung des Hintergrunds liefert. Zudem ist eine wichtige Beobachtung gewesen, dass, wenn π^- und π^+ aus demselben Event stammen, der Hintergrund bestmöglich dargestellt wird.

Diese Beobachtungen sind allesamt ebenso wie in Abbildung 4.8 auch in Abbildung 4.10 sichtbar. Es scheint folglich so, als seien diese Ergebnisse unabhängig von der Skalierung. Um diese These zu stärken, sind Abbildungen wie 4.8 und



Abbildung 4.9.: Alle Projektionen bei einer Skalierung an der Stelle $M_{\pi^0 \pi^+ \pi^-} = 0,80 \,\text{GeV}/\text{c}^2$ in einem Diagramm.



Abbildung 4.10.: Projektion der invarianten Masse geteilt durch die jeweiligen Möglichkeiten des Event Mixings bei einer Skalierung an der Stelle $M_{\pi^0 \pi^+ \pi^-} = 0,80 \,\text{GeV/c}^2.$

4.10 auch für Skalierungen bei einer Masse von $M_{\pi^0 \pi^+ \pi^-} = 0,70 \,\text{GeV/c}^2$ und $M_{\pi^0 \pi^+ \pi^-} = 0,85 \,\text{GeV/c}^2$ durchgeführt worden. Die Ergebnisse sind im Anhang in den Abbildungen A.7 und A.8 zu sehen. Sie unterstreichen die gemachten Annahmen. Folglich ist die Stelle der Skalierung für diese Beobachtungen irrelevant und zukünftige Diagramme werden an der Stelle $M_{\pi^0 \pi^+ \pi^-} = 0,75 \,\text{GeV/c}^2$ skaliert.

Die These, dass ein Überschätzen bzw. Unterschätzen des Hintergrunds mit den Pionen aus dem Zerfall des ω -Mesons zusammenhängen⁸, wird durch die Abbildungen 4.10, A.7 und A.8 ebenso unterstützt, da beispielsweise bei einer Skalierung an der Stelle $M_{\pi^0 \pi^+ \pi^-} = 0,80 \text{ GeV/c}^2$ bei abnehmender invarianter Masse eine Unterschätzung des Hintergrunds zu beobachten ist.

In den Kapiteln 4.2 und 4.3 werden zwei verschiedene Ansätze verfolgt, um die Gründe für das beschriebene Verhalten bezüglich des Events Mixings herauszufiltern.

Zur Erklärung der zuvor aufgestellten Thesen wird im Folgenden zum einen der Ansatz durch Korrelationen aufgrund von Zerfällen und zum anderen der Ansatz von Korrelationen aufgrund der Jet-Zugehörigkeit verfolgt. Da sich jedoch andeutet, dass Zerfälle die wahrscheinlichere Erklärung sind, ist dieses Kapitel ausgeprägter.

4.2. Korrelationen auf Grundlage von Zerfällen

Um das im letzten Abschnitt beschriebene Verhalten näher zu untersuchen, werden in diesem Abschnitt verschiedene Zerfälle ausgeschaltet, um den Hintergrund auf diese Art von Korrelationen zu überprüfen. Hierfür werden Diagramme wie die Abbildung 4.8 bei verschiedenen ausgeschalteten Zerfällen erstellt.

Zunächst stellt sich dabei die Frage, welche Zerfälle betrachtet werden müssen, bzw. welche für den Pionenhintergrund verantwortlich sind.

In Tabelle 2.4 des Abschnittes 2.2.2 sind einige Zerfallskanäle relevanter Mesonen dargestellt. Hierbei ist jedoch zu berücksichtigen, dass gar nicht alle aufgelisteten Mesonen dieser Tabelle wichtig bei der Betrachtung des Hintergrundes sind. Diese werden im Folgenden herausgefiltert.

Die Kaonen K⁺ und K⁻ sind nicht weiter zu berücksichtigen, da sie aufgrund ihrer Ladung sowie einer Lebensdauer von⁹ $1, 2 \cdot 10^{-8}$ s detektiert werden können. Ebenso kann das Kaon K⁰_L zwar nicht aufgrund seiner Ladung, jedoch wegen seiner langen Lebensdauer von¹⁰ $1, 2 \cdot 10^{-8}$ s von den Detektoren erfasst werden. Zudem zerfallen die K^{*} zu nahezu 100 % in¹¹ ein K und ein π . Da alle Kaonen bis auf das K⁰_S detektiert werden und die K^{*} in die zugehörigen pseudoskalaren Kaonen zerfallen, werden die Zerfälle von den K^{*} durch die Betrachtung des K⁰_S

⁸vgl. Abbildung 4.6

 $^{^{9}}$ vgl. [1, S. 240]

 $^{^{10}}$ vgl. [1, S. 240]

 $^{^{11}\}mathrm{vgl.}$ Tabelle 2.4



Abbildung 4.11.: Projektion der invarianten Masse geteilt durch die jeweiligen Event Mixing Möglichkeiten bei einer Skalierung von $M_{\pi^0\pi^+\pi^-} = 0,75 \text{ GeV/c}^2$ und ausgeschalteten Zerfällen von $K_{S^-}^0, \eta^-, \eta'^-, \varrho^+, \varrho^-$ - und ϱ^0 -Meson.

erfasst. Das entstehende Pion ist zudem zu vernachlässigen, da davon auszugehen ist, dass die Korrelationen aufgrund eines Mehr-Pionen-Zerfalls auftreten.

Somit müssen bei der Betrachtung von Korrelationen auf Grundlage von Zerfällen lediglich die ρ -Mesonen sowie das K⁰_S-, η - und η' -Meson¹² betrachtet werden. Die aufgezählten Mesonen können aufgrund ihrer neutralen Ladung oder kurzen Lebensdauer nicht detektiert werden.

Schaltet man diese Zerfälle aus und erzeugt ein Diagramm, in welchem, analog zu Abbildung 4.8, die invariante Masse geteilt durch das jeweilige Event Mixing (SGBG/BG) dargestellt ist, ergibt sich die Abbildung 4.11. Die wichtigste Erkenntnis aus Abbildung 4.11 ist, dass sich das Event Mixing, in dem π^+ und $\pi^$ aus demselben Event stammen, mit den Varianten, in denen π^+ und π^0 bzw. $\pi^$ und π^0 aus demselben Event sind, überlagert. Der Fall π^+ und π^- aus demselben Event wird somit im Gegensatz zu der Abbildung 4.8 **nicht** mehr bevorzugt. Hieraus folgt, dass somit mindestens einer der ausgeschalteten Zerfälle dafür sorgt, dass diese Variante bevorzugt wird.

Außerdem fällt auf, dass der Fall, in dem alle Pionen aus verschiedenen Events stammen, weiterhin eine signifikant schlechtere Darstellung des Hintergrunds bietet. Somit scheint es weiterhin Korrelationen zu geben. Da sich jedoch die weiteren drei Varianten des Event Mixings überlagern, ist es unwahrscheinlich, dass dies im Zusammenhang mit einem Zwei-Pionen-Zerfall steht. Denkbar wäre, dass dies aus dem Drei-Pionen-Zerfall des ω -Mesons entsteht, da eine Vielzahl von Pionen nicht mehr in das Diagramm eingetragen werden und folglich an-

 $^{^{12}}$ vgl. Tabelle 2.4

zunehmen ist, dass die meisten Pionen dieses Diagramms aus diesem Zerfall stammen. Eine solche Korrelation würde auch die Überlagerung erklären, da zwei Pionen aus demselben Event zwar weiterhin korreliert sind, jedoch alle drei Möglichkeiten gleichermaßen.

Eine weitere Erkenntnis ist die, dass die Darstellung des Hintergrunds durch das Ausschalten der eingangs erwähnten Zerfälle deutlich schlechter ist als in Abbildung 4.8 aus Abschnitt 4.1.1.1. Dies ist jedoch direkt ersichtlich, da eine Vielzahl von Korrelationen zwischen Pionen aufgrund von Zerfällen sowohl aus der Projektion des invarianten Massendiagramms als auch aus dem Event Mixing wegfällt. Somit ist die Übereinstimmung zwischen Projektion des Event Mixings und invarianter Masse geringer als zuvor und folglich die Darstellung des Hintergrundes schlechter.

In den folgenden Abschnitten werden zunächst kurz die Informationen zur Masse, Lebensdauer, den Zerfallskanälen und die zugehörigen Wahrscheinlichkeiten der betrachteten Mesonen aus Tabelle 2.4 wiederholt, um dem Leser an den relevanten Stellen einen Überblick über wichtige Informationen für die Analyse zu geben.

In den nachstehenden Unterabschnitten sind die Zerfälle der relevanten Mesonen¹³ zunächst weiterhin ausgeschaltet, jedoch wird ein einzelner¹⁴ Zerfall pro Unterabschnitt eingeschaltet, um dessen Auswirkungen auf die Abbildung 4.11 bzw. den Hintergrund zu prüfen.

Es sei darauf hingewiesen, dass wenn der Abschnitt zum Beispiel **Einschalten** von ρ -Zerfällen lautet, die Zerfälle von ρ^+ , ρ^- und ρ^0 -Meson zwar eingeschaltet, die Zerfälle von $K_{S^-}^0$, η - und η' -Meson jedoch weiterhin ausgeschaltet sind. Zudem ist anzumerken, dass wenn nicht **explizit** geschrieben wird, dass ein Zerfall weiterhin eingeschaltet bleibt, davon auszugehen ist, dass ein Einschalten eines anderen Zerfalls dazu führt, dass **alle** Zerfälle der weiteren relevanten Mesonen ausgeschaltet sind.

4.2.1. Einschalten von η -Zerfällen

In diesem Abschnitt werden im Gegensatz zu der Abbildung 4.11 Zerfälle des η -Mesons eingeschaltet. Wie in Tabelle 2.4 sichtbar, ist die Masse dieses Mesons $m_{\eta} = (547, 862 \pm 0, 017) \text{ MeV/c}^2$ und es zerfällt zu $(32, 68 \pm 0, 23) \%$ in drei π^0 sowie zu $(22, 92 \pm 0, 28) \%$ in π^0, π^+ und π^- . Es handelt sich somit um Drei-Pionen-Zerfälle. Der Zerfall in zwei γ ist irrelevant.

Die Darstellung von dem Verhältnis von SGBG und dem jeweiligen BG bei eingeschalteten η -Zerfällen ist der Abbildung 4.12 zu entnehmen.

Es fällt auf, dass sich in dieser Abbildung die drei Möglichkeiten des Event Mixings, in denen zwei Pionen aus demselben Event stammen, im Gegensatz zu Abbildung 4.11 nicht mehr überlagern. Die Zerfälle des η -Mesons führen folglich

 $^{^{13}}$ K⁰_S-, η -, η' -, ϱ^+ -, ϱ^- - und ϱ^0 -Meson

¹⁴zum Teil auch mehrere Zerfälle

dazu, dass das Event Mixing, bei dem π^- und π^+ aus dem gleichen Event sind, besser zur Darstellung des Hintergrundes geeignet ist als die Möglichkeiten, bei welchen π^0 und π^+ bzw. π^0 und π^- aus derselben Kollision stammen.

Es kommen zwei Möglichkeiten in Frage. Zum einen der Zerfall in π^0 , π^+ und π^- und zum anderen solcher in drei π^0 .

Der Zerfall in drei verschiedene Pionen scheint nicht der Grund für die bessere Darstellung zu sein, da alle entstehenden Pionen gleichermaßen in den verschiedenen Event-Mixing-Methoden berücksichtigt werden¹⁵. Zudem gibt es bei ausgeschalteten Zerfällen des η -Mesons ebenso einen Drei-Pionen-Zerfall in π^0 , π^+ und π^- , nämlich durch das ω -Meson. Hierbei ist jedoch eine Überlagerung feststellbar gewesen (vgl. Abbildung 4.11) und somit keine Bevorzugung des Event Mixings mit π^- und π^+ aus dem gleichen Event.

Hieraus ist zu folgern, dass der Zerfall des η -Mesons in drei π^0 dafür verantwortlich ist, dass es keine Überlagerung der drei Event-Mixing-Methoden mehr gibt. Um die Begründung hierfür feststellen zu können, ist es zunächst notwendig zu überlegen, welche Folgerungen dieser Zerfall sowohl auf die Projektion des invarianten Massendiagramms als auch auf die Projektion des Event Mixings hat.

Zunächst ist festzuhalten, dass die drei π^0 nicht untereinander kombiniert werden, da nur die Kombination von drei verschiedenen Pionenarten untersucht wird. Demnach bilden diese einen Teil des Untergrunds bei der Rekonstruktion, denn sie werden jeweils mit allen anderen π^+ und π^- kombiniert, und keine invariante Masse $M_{\pi^0\pi^-\pi^+}$ tritt hierbei signifikant häufiger auf. Dies ist die Folge für die Projektion des invarianten Massendiagramms.

Für die drei Varianten des Event Mixings, in denen zwei Pionen aus dem gleichen Event stammen, muss man zwischen denen unterscheiden, in welchen eines der Pionen ein π^0 ist und der, bei welcher keines der beiden Pionen ein π^0 ist.

Für die beiden Fälle, in denen ein π^0 und ein weiteres, andersartiges Pion aus einem Event sein müssen, folgt aus dieser Bedingung, dass weniger Einträge in das Diagramm möglich sind, da für jeden Eintrag diese Bedingung berücksichtigt werden muss. Es ist somit zwingend so, dass bei der Bildung nach der invarianten Massenmethode für die Varianten des Event Mixings, bei welchen ein π^0 und ein weiteres Pion aus demselben Event stammen, ein π^0 aus dem η -Zerfall mit einem andersartigen Pion aus demselben Event betrachtet wird. Dies liefert jedoch keinen Vorteil, da diese beiden Pionen keine Korrelationen zueinander aufweisen. Der Vorteil des Event Mixings, bei dem π^+ und π^- aus demselben Event sind, ist der, dass die Zahl an Kombinationen signifikant steigt, da es eine größere Zahl von π^0 gibt und keine Bedingung zu erfüllen ist, anders als bei den anderen beiden Möglichkeiten. Eine höhere Zahl an Kombinationen führt zu einer besseren Statistik für den Fall dreier verschiedenartiger unkorrelierter Pionen, welcher durch die Hinzunahme der η -Zerfällen eintritt. Somit stellt das Event Mixing, in dem π^+ und π^- aus demselben Event stammen, die beste Abbildung des Hinter-

¹⁵Ausgenommen ist hierbei die Möglichkeit, dass alle Pionen aus verschiedenen Events sind.



Abbildung 4.12.: Projektion der invarianten Masse geteilt durch die jeweiligen Möglichkeiten des Event Mixings bei einer Skalierung an der Stelle $M_{\pi^0 \pi^+ \pi^-} = 0,75 \text{ GeV/c}^2$ und eingeschalteten Zerfällen von η .

grunds dar. Diese These, dass eine erhöhte Zahl an möglichen Kombinationen dazu führt, dass der Hintergrund besser dargestellt wird, wird in den folgenden Abschnitten These eins genannt.

Generell fällt im Vergleich zu 4.11 jedoch auf, dass alle Arten des Event Mixings eine verbesserte Darstellung des Hintergrunds liefern. Grundlage dafür ist vermutlich die zuvor beschriebene erhöhte Zahl an Kombinationen. Die Darstellung des Hintergrunds ist jedoch nicht ansatzweise so gut wie in Abschnitt 4.1, in dem die Zerfälle von K_{S}^{0} -, η -, η' -, ϱ^{+} -, ϱ^{-} - und ϱ^{0} -Meson eingeschaltet sind.

4.2.2. Einschalten von K⁰_S-Zerfällen

In diesem Unterabschnitt werden die Zerfälle des η -Mesons wieder ausgeschaltet¹⁶ und Zerfälle des K⁰_S-Mesons eingeschaltet. Dieses Meson zerfällt zu¹⁷ (69, 20 ± 0, 05) % in π^+ und π^- sowie zu (30, 69 ± 0, 05) % in zwei π^0 . Die Masse beträgt $m_{\rm K^0_s} = (497, 611 \pm 0, 013) \,{\rm MeV/c^2}$.

Das Verhältnis von SGBG und BG ist für eingeschaltete Zerfälle des K_S^0 -Mesons in Abbildung 4.13 dargestellt.

Analog zu Abschnitt 4.2.1 bietet wiederum das Event Mixing, bei dem π^+ und π^- aus demselben Event stammen, die beste Darstellung des Hintergrunds. Die anderen beiden Varianten, bei denen zwei Pionen aus demselben Event stammen, überlagern sich nicht mehr in einer derartigen Genauigkeit wie in den

 $^{^{16}}$ Hierbei ist zu berücksichtigen, dass Zerfälle der $\varrho\text{-}Mesonen und des <math display="inline">\eta'\text{-}Mesons$ weiterhin ausgeschaltet bleiben.

 $^{^{17}}$ vgl. Tabelle 2.4



Abbildung 4.13.: Projektion der invarianten Masse geteilt durch die jeweiligen Event-Mixing-Möglichkeiten bei einer Skalierung an der Stelle $M_{\pi^0 \pi^+ \pi^-} = 0,75 \text{ GeV}/c^2$ und eingeschalteten Zerfällen von K_S^0 .

Abbildungen 4.11 oder 4.12, jedoch wird dieser Unterschied als nicht signifikant angenommen. Um die Ursache hierfür zu finden, wäre es interessant die Kinematik der Zerfallsprodukte zu untersuchen. Dies soll an dieser Stelle nicht gemacht werden.

Das Einschalten der Zerfälle dieses Mesons ist vor allem in Bezug auf die These der besseren Beschreibung des Hintergrunds aufgrund von einer erhöhten Zahl an Kombinationen (vgl. Abschnitt 4.2.1) interessant. Betrachtet man die Zerfallskanäle, so tritt ein Zerfall in π^+ und π^- mit einer Wahrscheinlichkeit von ca. 2/3 und ein Zerfall in zwei π^0 mit einer Wahrscheinlichkeit von ca. 1/3 auf. Gibt es folglich drei Zerfälle des K_S^0 -Mesons, so folgen hieraus jeweils zwei π^+ , π^- und π^0 . Die Zahl der einzelnen Pionen nimmt somit um die gleiche Zahl zu.

Da sich bei ausgeschaltetem K_S^0 -Zerfall die drei Varianten des Event Mixings, in denen zwei Pionen aus demselben Event stammen, überlagern (vgl. Abbildung 4.11), ist bei Anwendung der These einer besseren Darstellung des Hintergrunds aufgrund von einer größeren Zahl an Kombination davon auszugehen, dass diese Überlagerung beibehalten werden müsste, wenn Zerfälle des K_S^0 -Mesons zugelassen würden. Wie in Abbildung 4.13 sichtbar, ist dies nicht der Fall, denn in dieser Abbildung bildet das Event Mixing, bei dem π^+ und π^- aus demselben Event sind, die beste Beschreibung. Somit scheint es neben dieser These weitere Gründe für eine verbesserte Darstellung zu geben.

Eine Möglichkeit, die dieses Verhalten beschreiben könnte, wäre die, dass das bevorzugte Event Mixing, in welchem π^+ und π^- aus derselben Kollision sind, die Korrelation aus dem Zerfall von K_S^0 in ein π^+ und ein π^- erfasst. In dieser Art des Event Mixings wird somit der Fall durchlaufen, in welchem bei der Betrachtung von den drei Pionen π^0, π^- und π^+ das π^+ und das π^- aus demselben Event bzw. sogar aus demselben Zerfall stammen. Dieser Fall wird ebenso bei der Erstellung des invarianten Massendiagramms durchlaufen. Somit gibt es hierbei eine Übereinstimmung zwischen der Projektion des invarianten Massendiagramms und der des hier dargestellten Event Mixings.

Diese Erfassung einer solchen Korrelation wird weder von dem Event Mixing, in dem π^+ und π^0 aus demselben Event sind, noch von dem, in welchem π^- und π^0 aus derselben Kollision stammen, erfasst, da die zweite mögliche, derartige Korrelation in einer Kombination aus zwei π^0 bestünde. Dieser Fall ist für die Erstellung des invariante Massendiagramms jedoch unerheblich, da drei verschiedenartige Pionenkombinationen betrachtet werden müssen.

Dies ist somit die zweite These, welche eine verbesserte Darstellung erklären könnte. Rein logisch gesehen scheint dieser Effekt jedoch eine geringere Gewichtung zu besitzen als die erste These, die den verbesserten Hintergrund erklärt¹⁸, da es bei der Kombinationsbildung zur Betrachtung der invarianten Masse mehr Kombinationen gibt, in welchen die Pionen zusammenhangslos sind und ein sogenannter kombinatorischer Hintergrund auftritt.

Die generelle Beschreibung des Hintergrunds ist vergleichbar mit der aus dem vorherigen Unterabschnitt.

4.2.3. Einschalten von *Q*-Zerfällen

Die ρ -Mesonen besitzen jeweils eine Masse von $m_{\rho} = (775, 26 \pm 0, 25) \text{ MeV/c}^2$ und zerfallen zu nahezu 100 % in¹⁹ zwei Pionen. Gibt es kein bevorzugtes ρ -Meson, d.h. tritt keines der drei Mesonen signifikant häufiger als die anderen beiden auf, scheint es nicht so, als sei dieses Meson verantwortlich für eine verbesserte Darstellung des Hintergrunds durch das Event Mixing, bei dem π^- und π^+ aus demselben Event stammen, gegenüber solchem, bei dem π^- und π^0 bzw. π^+ und π^0 aus demselben Event sind. Dies liegt daran, dass aus keiner Bevorzugung folgen würde, dass die drei Korrelationen nahezu in gleicher Häufigkeit aufträten. Nach den Thesen aus den Abschnitten 4.2.1 und 4.2.2 müssten sich diese drei Arten des Event Mixings dann weiterhin überlagern.

Es lässt sich vorweg vermuten, dass weder der Zerfall des ρ^+ - noch der des ρ^- -Mesons mit einer signifikanten Mehrzahl auftritt, da sich die Variante des Events Mixings, in der π^- und π^0 aus dem gleichen Event stammen, und die, in der π^+ und π^0 aus dem gleichen Event sind, überlagern²⁰. Diese beiden Zerfälle sind jedoch die einzigen beiden, in welchen eines der betrachteten Mesonen in π^- und π^0 bzw. π^+ und π^0 zerfällt²¹.

Zunächst wird untersucht, wie sich die Darstellung des Hintergrunds ändert,

¹⁸vgl. Abschnitt 4.2.1

 $^{^{19}}$ vgl. [5]

 $^{^{20}\}mathrm{vgl.}$ Abbildung 4.11

 $^{^{21}}$ vgl. Tabelle 2.4



Abbildung 4.14.: Projektion der invarianten Masse geteilt durch die jeweiligen Möglichkeiten des Event Mixings bei einer Skalierung an der Stelle $M_{\pi^0 \pi^+ \pi^-} = 0,75 \text{ GeV/c}^2$ und eingeschalteten Zerfällen von ϱ^0, ϱ^+ und ϱ^- .

wenn die Zerfälle von ρ^0 -, ρ^+ - und ρ^- -Meson eingeschaltet sind²². Es ergibt sich die Abbildung 4.14. Es ist anzumerken, dass in dieser Abbildung statt ρ ρ in der Legende verwendet worden ist, da es bei der Erstellung nicht möglich gewesen ist das Zeichen ρ zu nutzen.

Anhand dieser Abbildung scheint es so, als würde die vorweggenommene Vermutung nicht korrekt sein, da das Event Mixing mit π^- und π^0 aus demselben Event minimal über den weiteren Event-Mixing-Methoden mit zwei Pionen aus derselben Kollision zu liegen scheint. Die Frage, die sich dabei stellt, ist, wie signifikant diese Abweichung ist. Der Unterschied ist in einer Größenordnung von ca. 0,1 %. Dennoch ist die Abweichung sichtbar. Der Untersuchung, ob es Unterscheidungen vom Event Mixing mit π^- und π^0 und solchem mit π^+ und π^0 aus demselben Event aufgrund eines Zerfalls von ρ^+ bzw. ρ^- gibt, wird in dem Unterabschnitt 4.2.3.2 nachgegangen. Eine solche Unterscheidung ist jedoch wegen der Grundlage, auf welcher die vorweggenommene Vermutung basiert, sehr unwahrscheinlich.

Im Gegensatz zu den vorherigen Unterabschnitten fällt zudem in Abbildung 4.14 auf, dass der Hintergrund im Allgemeinen signifikant besser dargestellt wird als in vorherigen Abschnitten²³. Erklärbar wird dies unter Zuhilfenahme von These eins aus Abschnitt 4.2.1. Das ρ -Meson scheint signifikant häufig aus den Kollisionen hervorzugehen und da es zu nahezu 100 % in zwei Pionen zerfällt, besteht der Untergrund zu einem Großteil aus Pionen aus ρ -Zerfällen. Lässt man diese Zerfälle demnach zu, steigt die Anzahl an Kombinationen im Event

 $^{^{22}\}mathrm{Die}$ weiteren betrachteten Zerfälle sind weiterhin abgeschaltet.

 $^{^{23}\}mathrm{vgl.}$ Abbildungen 4.11, 4.12 und 4.13

Mixing ebenso wie solche bei der Erzeugung des invarianten Massendiagramms. Da hierbei drei Pionen kombiniert werden, stehen die Pionen aus dem Zerfall der ρ -Mesonen bei einer Bildung einer Dreier-Kombination zu mindestens einem weiteren Pion dieser Dreier-Kombination in keiner Korrelation. Signifikant häufiger tritt jedoch der Fall ein, dass zur Berechnung der invarianten Masse ein Pion, welches aus dem Zerfall eines ρ -Mesons stammt, mit zwei Pionen kombiniert wird, welche in keiner Verbindung zu diesem sowie zueinander stehen. Somit entsteht ein kombinatorischer Hintergrund, welcher, wie in These eins bereits angedeutet, bestmöglich mit einer hohen Zahl an Kombinationen bei der Bildung der Diagramme des Event Mixings beschrieben wird. Zu dieser Vielzahl an Kombinationen kommt es aufgrund der hohen Anzahl an Pionen, die aus ρ -Mesonen entstanden sind.

Für eine detaillierte Analyse werden statt aller Zerfälle der ρ -Mesonen einzelne ρ -Mesonen eingeschaltet und die anderen ausgeschaltet. Dieses Vorgehen wird in den folgenden Unterabschnitten vollzogen.

4.2.3.1. Einschalten von ρ^0 -Zerfällen

Zunächst werden Zerfälle des ρ^0 -Mesons eingeschaltet. Da dieses Meson zu nahezu 100 % in π^+ und π^- zerfällt, ist anzunehmen, dass sich die Möglichkeiten π^+ und π^0 sowie π^- und π^0 aus einem Event weiterhin überlagern, jedoch gegenüber dem Fall π^- und π^+ aus derselben Kollision bevorzugt werden, da durch den Zerfall des ρ^0 -Mesons eine größere Zahl an π^- und π^+ auftritt. Dies führt sowohl bei der invarianten Massenmethode zur Rekonstruktion des ω -Mesons als auch bei der Bildung des Event Mixings zu einer größeren Zahl an Kombinationsmöglichkeiten. Die Variante π^- und π^+ aus demselben Event unterliegt jedoch der Bedingung, dass die zusätzlich auftretenden π^- und π^+ aus derselben Kollision stammen müssen. Folglich sind für dieses Event Mixing weniger Kombinationsmöglichkeiten als für die weiteren zwei Arten des Event Mixings, in denen zwei Pionen aus dem gleichen Zerfall stammen, vorhanden, da das auftretende²⁴ $\pi^$ bzw.²⁵ π^+ in keiner Beziehung zu dem π^+ bzw. π^- zur Bildung des invarianten Massendiagramms des Event Mixings stehen muss²⁶.

Zwar ist auf These zwei zu verweisen, die eine Verbesserung der Darstellung des Hintergrunds durch eine Variante des Event Mixings vorhersagt, wenn die Zerfallsprodukte (hier: π^+ und π^-) den Pionen entsprechen, welche beim Event Mixing aus demselben Event stammen müssen (hier: Event Mixing, bei dem π^+ und π^- aus dem gleichen Event sind), jedoch ist dieser Effekt dem aus These eins signifikant unterlegen. Diese Schlussfolgerungen, welche aus den vorherigen Unterabschnitten stammen, sind vollständig in der Abbildung 4.15 sichtbar, in der der Zerfall des ϱ^0 eingeschaltet wird.

Zudem ist, wie erwartet und in dem allgemeinen Abschnitt über das Einschalte-

²⁴In dem Fall des Event Mixing, in dem π^- und π^0 aus demselben Event stammen.

 $^{^{25} {\}rm In}$ dem Fall des Event Mixing, in dem
 π^+ und π^0 aus demselben Event stammen.
 $^{26} {\rm vgl.}$ These eins



Abbildung 4.15.: Projektion der invarianten Masse geteilt durch die jeweiligen Event-Mixing-Möglichkeiten bei einer Skalierung bei $M_{\pi^0 \pi^+ \pi^-} = 0,75 \text{ GeV/c}^2$ und eingeschaltetem Zerfall von ϱ^0 .

ten der ρ -Mesonen erläutert, zu sehen, dass sich die generelle Darstellung des Hintergrunds durch alle Varianten des Event Mixings verbessert. Dies gilt ebenso für den Fall des Event Mixings, in dem alle Pionen aus verschiedenen Events sind, da auch in dieser Variante die Zahl an Kombinationsmöglichkeiten steigt. Grundlage hierfür bildet die These eins aus Abschnitt 4.2.1.

Es stellt sich die Frage, wieso diese Methode nicht die beste Darstellung des Hintergrunds bietet, da in diesem Fall die höchste Anzahl an Kombinationsmöglichkeiten erreicht werden kann und zuvor angedeutet worden ist, dass dieser Effekt dem der erfassten Korrelationen überlegen zu sein scheint. Diese Überlegenheit bezog sich jedoch lediglich auf den Fall, dass es nur **eine** Korrelation gibt, die von einem Event Mixing erfasst wird und von allen weiteren nicht. Bei einer Vielzahl von erfassten Korrelationen ist es selbstverständlich, dass der Effekt aus These zwei überwiegt.

4.2.3.2. Einschalten von ρ^+ - und ρ^- -Zerfällen

Wie in der Analyse der Abbildung 4.14 beschrieben worden ist, wird zunächst untersucht, ob es Unterscheidungen zwischen den Methoden des Event Mixings, in welchen π^+ und π^0 bzw. π^- und π^0 aus derselben Kollision sind, bei der Darstellung des Hintergrund, aufgrund der Zerfälle von ρ^+ und ρ^- , gibt. Somit werden zunächst ρ^+ - und ρ^- -Zerfälle eingeschaltet. Es ergibt sich die Abbildung 4.16. In dieser ist keiner der beiden Event Mixing Methoden signifikant besser. Sollte man somit weiterhin davon ausgehen, dass der Unterschied in Abbildung 4.14 signifikant ist, wäre der einzige Zerfall, der dafür verantwortlich sein könnte



Abbildung 4.16.: Projektion der invarianten Masse geteilt durch die jeweiligen Event-Mixing-Möglichkeiten bei einer Skalierung bei $M_{\pi^0 \pi^+ \pi^-} = 0,75 \text{ GeV}/\text{c}^2$ und eingeschalteten Zerfällen von ϱ^+ und ϱ^- .

der des ρ^0 -Meson. Wenn lediglich dieser eingeschaltet ist, ist jedoch ebenso kein Unterschied erkennbar²⁷. Somit wird an dieser Stelle angenommen, dass diese Unterscheidung möglicherweise auf einen ungünstigen Skalierungspunkt zurückgeführt werden kann. Somit wird davon ausgegangen, dass weder der ρ^+ noch der ρ^- -Zerfall bevorzugt wird. Es wird folglich lediglich eine Abbildung erstellt, in welcher der Zerfall des ρ^+ -Mesons eingeschaltet wird, da eine weitere Abbildung mit dem Einschalten des ρ^- -Mesons²⁸ keinen Mehrwert liefern würde. Anzumerken ist, dass der Hintergrund links des Peaks in der Abbildung 4.16 nahezu perfekt durch das Event Mixing erfasst wird.

Aufgrund vorheriger Thesen ist davon auszugehen, dass ein Einschalten des ϱ^+ -Zerfalls dazu führt, dass sich die Varianten, in denen π^+ und π^- bzw. π^- und π^0 aus derselben Kollision herrühren, überlagern und zusätzlich eine bessere Darstellung des Hintergrunds liefern, als das Event Mixing, in dem π^+ und π^0 aus dem gleichen Event sind. Dies folgt aus der These eins, welche zuvor schon ausgiebig erläutert worden ist und somit an dieser Stelle auf die vorherigen Abschnitte verwiesen wird.

Aus dieser These folgt ebenso, dass die Darstellung des Hintergrunds durch alle Möglichkeiten des Event Mixings besser dargestellt wird als zum Beispiel in den Abschnitten 4.2.1 oder 4.2.2. Nähere Erläuterungen hierzu sind dem Teil dieses Abschnittes zu entnehmen, in dem alle Zerfälle von ρ -Mesonen eingeschaltet worden sind²⁹.

Diese Folgerungen aus den Thesen werden allesamt durch die Abbildung 4.17

²⁷vgl. Abschnitt 4.2.3.1 und insbesondere Abbildung 4.15

 $^{^{28}\}mathrm{Folglich}$ würde dann der $\varrho^+\mathrm{Zerfall}$ ausgeschaltet.

 $^{^{29}\}mathrm{vgl.}$ Anfang des Abschnittes 4.2.3



Abbildung 4.17.: Projektion der invarianten Masse geteilt durch die jeweiligen Möglichkeiten des Event Mixings bei einer Skalierung bei $M_{\pi^0 \pi^+ \pi^-} = 0,75 \text{ GeV/c}^2$ und eingeschaltetem Zerfall von ϱ^+ .

bestätigt.

4.2.4. Einschalten von η' -Zerfällen

Das η' -Meson hat eine Masse von $m_{\eta'} = (957, 78 \pm 0, 06) \text{ MeV/c}^2$ und zerfällt zu $(42, 9 \pm 0, 7)\%$ in π^+ , π^- und η sowie zu $(22, 3 \pm 0, 8)\%$ in zwei π^0 und η . Der Zerfall in ϱ^0 und ein γ , welcher zu $(29, 1 \pm 0, 5)\%$ auftritt, wird in diesem Abschnitt nicht weiter berücksichtigt, da ein Zerfall von ϱ^0 bereits in Abschnitt 4.2.3.1 behandelt worden ist. Zudem werden die Pionen, welche aus dem η entstehen würden, nicht berücksichtigt, da dieser Zerfall weiterhin ausgeschaltet ist. Die Lebensdauer des η' -Meson beträgt $3, 3 \cdot 10^{-21}$ s, sodass es unmöglich erscheint, dieses Meson direkt zu detektieren.

Bildet man analog zu den vorherigen Unterabschnitten das Verhältnis der Projektion von dem invarianten Massendiagramm zu dem jeweiligen Event Mixing bei eingeschaltetem Zerfall von η' , so ergibt sich die Abbildung 4.18.

In diesem Diagramm ist nahezu kein Unterschied zu dem Fall, in dem der Zerfall des η' -Meson ausgeschaltet ist³⁰, zu erkennen. Der einzige erkennbare Unterschied ist, dass sich die drei Varianten des Event Mixings, in denen zwei Pionen aus dem gleichen Event stammen, nicht mehr perfekt überlagern, sondern minimale Unterschiede sichtbar sind. Es ist zwar zu erkennen, dass das Event Mixing, bei dem π^0 und π^- aus demselben Event sind, rechts von dem Peak, unterhalb der Varianten des Event Mixings, in welchen π^0 und π^- bzw. π^+ und π^- aus derselben Kollision stammen, verläuft, jedoch scheint dieses Verhalten

³⁰vgl. Abbildung 4.11



Abbildung 4.18.: Projektion der invarianten Masse geteilt durch die jeweiligen Event-Mixing-Möglichkeiten bei einer Skalierung an der Stelle $M_{\pi^0 \pi^+ \pi^-} = 0,75 \,\text{GeV/c}^2$ und einschalteten Zerfällen von η' .

nicht signifikant zu sein.

Aufgrund von zuvor aufgestellten Thesen wäre zu erwarten gewesen, dass das Event Mixing, in dem π^+ und π^- aus derselben Kollision herrühren, den Hintergrund wiederum am besten abbildet, da die Zerfallswahrscheinlichkeiten von dem η' in π^+, π^- und η , analog zum Zerfall des K_S^0 -Mesons³¹, doppelt so hoch ist wie die Wahrscheinlichkeit für den Zerfall in zwei π^0 und η . Mit einer ähnlichen Erklärung wie in Abschnitt 4.2.2, folgt daraus, dass die Erhöhung der Zahl der entstehenden Kombinationen zwischen den drei Möglichkeiten des Event Mixings, in denen zwei Pionen aus dem gleichen Event sind, nahezu gleich ist. Da die Methode, bei der π^+ und π^- aus derselben Kollision sind, jedoch zudem die Korrelation aus dem Zerfall erfasst, ist davon auszugehen gewesen, dass diese Variante den Hintergrund am besten abbildet. Für nähere Erläuterungen und detaillierte Begründungen sei auf den Abschnitt 4.2.2 verwiesen.

Dass ein solches Verhalten nicht sichtbar ist, liegt daran, dass das η' -Meson in der Proton-Proton-Kollision nicht sonderlich häufig auftrifft. Zudem ist zu berücksichtigen, dass nahezu 30 % der auftretenden η' in ein ϱ und ein γ zerfallen. Durch das Einschalten dieses η' -Zerfalls sind folglich nicht signifikant viele Pionen an der Bildung der Rekonstruktion des ω -Mesons durch das invariante Massendiagramm beteiligt und Veränderungen bleiben größtenteils aus.

 $^{^{31}\}mathrm{vgl.}$ Abschnitt 4.2.2

4.3. Korrelationen auf Grundlage von Jet-Zugehörigkeit

Bei der Untersuchung der Korrelation aufgrund von Jet-Zugehörigkeit werden an dieser Stelle zunächst die Möglichkeiten von der Jet-Zugehörigkeit dreier Pionen aufgelistet, wie es bereits in der Theorie (vgl. Abschnitt 3.5) getan worden ist. Die folgende Kombinationen sind denkbar:

- 1. $\pi^+ \pi^-$ aus gleichem Jet
- 2. $\pi^0 \pi^-$ aus gleichem Jet
- 3. $\pi^+ \pi^0$ aus gleichem Jet
- 4. alle drei Pionen aus gleichem Jet
- 5. alle drei Pionen aus verschiedenen Jets
- 6. π^+ und π^- sowie π^+ und π^0 aus gleichem Jet; nicht aber π^- und $\pi^0 \Rightarrow \pi^+$ in zwei Jets
- 7. π^- und π^+ sowie π^- und π^0 aus gleichem Jet; nicht aber π^+ und $\pi^0 \Rightarrow \pi^-$ in zwei Jets
- 8. π^0 und π^- so wie π^0 und π^+ aus gleichem Jet; nicht aber π^- und π^+ $\Rightarrow \pi^0$ in zwei Jets .

Da in Abschnitt 4.1 sichtbar geworden ist, dass der Hintergrund bei der Rekonstruktion des ω -Mesons besser durch die Variante π^- und π^+ aus demselben Event dargestellt wird als durch solche in denen π^- und π^0 bzw. π^+ und π^0 aus demselben Event stammen, sind lediglich die Kombinationen 1, 2 und 3 der Jet-Zugehörigkeit zu betrachten, um festzustellen, ob es Korrelationen gibt. Erstellt man unter den jeweiligen Voraussetzungen invariante Massendiagramme, so ergeben sich die Abbildungen 4.19, 4.20 und 4.21. Zusätzlich wird jedoch der Fall aufgezeigt, in welchem alle Pionen aus demselben Jet stammen, welcher in Abbildung 4.22 sichtbar ist. Der Grund hierfür wird im Folgenden näher erläutert.



Abbildung 4.19.: In diesem Diagramm stammen das π^+ und das π^- aus dem gleichen Jet. Es sind eine Millionen Events durchgeführt worden.



Abbildung 4.20.: In diesem Diagramm stammen das π^0 und das π^- aus dem gleichen Jet. Es sind eine Millionen Events durchgeführt worden.



Abbildung 4.21.: In diesem Diagramm stammen das π^0 und das π^+ aus dem gleichen Jet. Es sind eine Millionen Events durchgeführt worden.



Abbildung 4.22.: In diesem Diagramm stammen alle drei Pionen aus dem gleichen Jet. Es sind eine Millionen Events durchgeführt worden.

Der Grund dafür, dass zusätzlich das Diagramm für den Fall erstellt worden ist, in dem alle Pionen aus demselben Jet stammen, ist anhand von Abbildung 4.22 direkt ersichtlich, wenn man die verschiedene Skalierung des transversalen Impulses p_T auf der y-Achse berücksichtigt. Für einen großen transversalen Impuls (>7 Gev/c) befinden sich nahezu alle Einträge in dem Diagramm, in dem die drei Pionen aus demselben Jet stammen. So scheint es auf den ersten Blick, als befänden sich in Abbildung 4.22 mehr Einträge als in den Abbildungen 4.19, 4.20 und 4.21. Dies ist jedoch nicht der Fall, da sich vor allem im Bereich niedriger p_T (< 2 Gev/c) signifikant mehr Einträge in diesen drei Abbildungen befinden. Das Problem daran ist, dass, wie in Abschnitt 4.1 angedeutet, die Pionen aus dem Zerfall des ω -Mesons für einen solch niedrigen Wert des transversalen Impuls von dem Hintergrund überlagert werden und folglich kein Peak wie zum Beispiel in Abbildung 4.22 bei der Masse des ω -Mesons sichtbar wird.

Es soll jedoch darum gehen, zu prüfen, ob sich die bestmögliche Darstellung des Hintergrunds durch die Variante des Event Mixings, in der π^- und π^+ aus demselben Event stammen, damit erklären lässt, dass sich bestimmte Pionen bevorzugt in einem Jet befinden. Hierzu werden die Abbildungen 4.19, 4.20, und 4.21 wiederum auf die x-Achse projiziert, ebenso wie die invariante Masse aus Abschnitt 4.1 (vgl. die Abbildungen 4.1 und 4.3), und an die Projektion der invarianten Masse skaliert. Daraufhin wird die Projektion der invarianten Masse durch die Projektion der verschiedenen Jet-Zugehörigkeiten geteilt, um festzustellen, ob eine gewisse Kombination von Pionen in einem Jet eine verbesserte Darstellung des Hintergrunds liefert als die übrigen. Analog zu Abschnitt 4.2 wird die Bildung dieses Verhältnisses wiederum als SGBG/BG bezeichnet. Dieses Vorgehen wird für verschiedene Skalierungen durchgeführt. Die Ergebnisse sind den Abbildungen 4.23 (a) und (b) zu entnehmen.

In der Abbildung 4.23 (a) scheint es, als würde sich der Fall, in dem sich das π^0 und π^- in demselben Jet befinden, anders verhalten als die übrigen Möglichkeiten. Dies ist jedoch lediglich ein Zufall, wie Wiederholungen an anderen Skalierungsstellen beweisen. Hierfür wird in dieser Arbeit als Beispiel zusätzlich bei einer Masse von $M_{\pi^0 \pi^+ \pi^-} = 0,79 \,\text{GeV}/c^2$ skaliert. An dieser Stelle verhalten sich die verschiedenen Kombinationen nahezu identisch. Es fällt jedoch auf, dass diese Methode, bei welcher Projektion der verschiedenen Jet-Zugehörigkeiten an einem Punkt an die Projektion der invarianten Masse skaliert werden, generell keine gute Möglichkeit ist, um den Hintergrund darzustellen. Dies ist nicht der Anspruch der Bachelorarbeit, da lediglich untersucht werden soll, wie sich die drei verschiedenen Kombinationen zueinander verhalten und ob es Unterscheidungen gibt. Diese könnte man bei entsprechender Beobachtung als Indiz werten, dass Jets dafür verantwortlich sind, dass die Variante π^0 und π^- aus demselben Event des Event Mixings den Hintergrund am besten darstellt.

Abbildungen wie 4.23 sind zusätzlich für andere Skalierungspunkte durchgeführt worden, jedoch gibt es kein erkennbares Muster nach dem sich eine Variante konsequent von den anderen unterscheidet.

Somit scheint es auf den ersten Blick kein Indiz dafür zu geben, welches nach sich ziehen würde verschiedene Jet-Zugehörigkeiten näher zu untersuchen bzw. davon auszugehen, dass diese Korrelation der Grund für das beobachtete Verhalten aus Abschnitt 4.1 ist.

Wie bereits beschrieben eignet sich diese Methode auch nicht für eine präzise Untersuchung, sondern dafür einen ersten Überblick darüber zu gewinnen, auf welche der beiden Korrelationsgrundlagen näher untersucht werden sollte. Die Abbildungen schließen jedoch nicht aus, dass es nicht doch Korrelationen geben könnte, welche bei intensiverer Betrachtung von Jets sichtbar werden.



(b) Skalierung bei der invarianten Masse $M_{\pi^0 \pi^+ \pi^-} = 0,79 \,\text{GeV}/\text{c}^2$.

Abbildung 4.23.: Projektion der invarianten Masse jeweils geteilt durch die Jet Konstellationen bei unterschiedlicher Skalierung.

5. Diskussion der Ergebnisse und Ausblick

5.1. Diskussion und Zusammenfassung der Ergebnisse

5.1.1. Allgemeine Analyse

Die wichtigste Erkenntnis aus dem Abschnitt 4.1 ist gewesen, dass der Hintergrund am besten dadurch beschrieben wird, wenn ein Event Mixing verwendet wird, bei welchem π^+ und π^- aus demselben Event stammen. Die Bevorzugung dieser Kombination gegenüber denen, bei welchen π^+ und π^0 bzw. π^- und π^0 aus demselben Event sind, ist auf dem ersten Blick nicht erklärbar gewesen, da es aus rein intuitiver Sicht zunächst keinen Grund dafür zu geben scheint. Hingegen scheint es logisch zu sein, dass π^+ und π^0 bzw. π^- und π^0 aus demselben Event den Hintergrund gleich gut darstellen, da kein Grund zur Annahme besteht, dass der Hintergrund eine größere Anzahl an Korrelationen aufgrund einer gewissen Ladung gegenüber der anderen bevorzugt.

Außerdem scheint es ebenso ersichtlich zu sein, dass der Hintergrund am schlechtesten dargestellt wird, wenn alle Pionen aus verschiedenen Events sind, da hierdurch keine Korrelationen berücksichtigt werden, welche sich jedoch im Hintergrund alleine aufgrund von Zerfällen befinden müssen.

Die Zusammenfassung der Gründe dieses Verhaltens ist in Abschnitt 5.1.2 gegeben.

Zudem sei darauf verwiesen, dass es weitere Zerfälle von Teilchen in Pionen gibt und in dieser Arbeit nicht alle auftretenden Pionen-Zerfälle betrachtet werden konnten, sondern lediglich solche, die am häufigsten auftreten.

Eine weitere interessante These des Abschnittes 5.1.1 ist gewesen, dass die Überschätzung bzw. Unterschätzung des Hintergrundes mit den Kombinationen der Pionen aus dem ω -Zerfalls selbst zusammenhängt, da der Verlauf der Abbildung 4.6 ein solches Verhalten erklären würde. Die Argumente, die dies in Abschnitt 5.1.1 nahelegen, sind jedoch keineswegs als Beweis zu verstehen, sondern als Indizien, die eine weitere Auseinandersetzung mit dieser Thematik anregen sollen.

5.1.2. Korrelationen auf Grundlage von Zerfällen

Die wichtigsten Erkenntnisse des Abschnittes 4.2 und ebenso dieser Bachelorarbeit werden im Folgenden wiederholt und zusammengefasst.

Die Güte der Beschreibung des Hintergrunds hängt in signifikantem Maße davon ab, ob der Zerfall der ρ -Mesonen eingeschaltet ist. Sollte dies der Fall sein, führen **alleine** die Pionen aus diesen Zerfällen zu einer massiven Verbesserung der Darstellung des Hintergrundes.

Erklärt worden ist dies mit der These eins, welche, speziell auf den Fall der ρ -Mesonen angewandt, besagt, dass durch den Zwei-Pionen-Zerfall der ρ -Mesonen die Zahl der Pionen (sowohl π^+ , π^- als auch π^0) signifikant zunimmt, da dieses Meson sehr häufig auftritt. Da jedoch Drei-Pionen-Kombinationen gebildet werden, werden die Pionen aus diesem Zerfall bei der Erstellung eines invarianten Massendiagramms zur Rekonstruktion des ω -Mesons mit Pionen kombiniert, welche keinen Bezug zu diesen besitzen. Es ist zwar denkbar, dass zwei der drei Pionen zur Berechnung der invarianten Masse aus demselben ρ -Zerfall sind, jedoch ist das sehr unwahrscheinlich, da die Zahl von Pionen durch das Einschalten des ρ -Zerfalls signifikant zunimmt.

Wahrscheinlicher ist es, dass diese drei Pionen keine direkten Korrelationen besitzen. Es entsteht der sog. kombinatorische Hintergrund in dem invarianten Massendiagramm, welcher zu einem Großteil aus Pionen aus ρ -Zerfällen stammt. Dieser wird umso besser durch das Event Mixing beschrieben, je mehr Kombinationen gebildet werden können. Da bereits angedeutet worden ist, dass das ρ signifikant häufig auftritt, wird dies gewährleistet und der Hintergrund bei eingeschalteten ρ -Zerfällen deutlich besser dargestellt als wenn dieser Zerfall ausgeschaltet wird. Er hat folglich den größten Einfluss.

Zusätzlich ist aufgefallen, dass die vier verschiedenen Varianten des Events Mixings eine unterschiedlich gute Darstellung bieten. Dass die drei Methoden, bei denen zwei Pionen aus einem Event stammen, den Hintergrund besser darstellen, wird bei Betrachtung der These zwei deutlich. Werden Korrelationen durch das Event Mixing erfasst, wie solche bei denen zwei Pionen aus demselben ρ -Zerfall stammen, werden Kombinationen bei der Bildung des Event Mixings miteinbezogen, welche ebenso bei der Erzeugung des invarianten Massendiagramm auftreten. Kommt es zum Beispiel zu einem Zerfall von ρ^0 in ein π^+ und π^- , so werden Kombinationen bei der Rekonstruktion des ω -Mesons gebildet, in denen diese zwei mit einem π^0 kombiniert werden. Diese Korrelation wird jedoch lediglich bei einem Event Mixing erfasst, nämlich dem, bei welchem π^+ und ein π^- aus derselben Kollision stammen. Bei einer Vielzahl von Korrelationen durch verschiedenste Zerfälle, ist somit verständlich, wieso die Methoden, in denen zwei Pionen aus demselben Event stammen, besser den Hintergrund darstellen als die Methode, in welcher alle Pionen aus verschiedenen Events sind. Dies hat jedoch auch einen Effekt auf die drei Event-Mixing-Methoden untereinander, wofür das ρ-Meson jedoch aufgrund der Vielzahl von entstehenden Pionen ein schlechtes Beispiel ist, da hierbei der Effekt aus These eins dominiert.

Ein besseres Beispiel ist das K_S^0 . Hierbei hebt sich die Zunahme an möglichen Kombinationen zwischen den drei Methoden des Event Mixings, mit zwei Pionen aus demselben Event, nahezu auf, jedoch ist der Fall, in dem π^+ und π^- aus derselben Kollision sind, am besten geeignet, um den Hintergrund darzustellen, da diese Variante als einzige einen möglichen Zerfall (und somit eine Korrelation) von K_S^0 erfasst. Die Übereinstimmung der Zerfallsprodukte eines Zwei-Pionen-Zerfall mit den Pionen, die bei dem jeweiligen Event Mixing beide aus demselben Event stammen müssen, kann somit zu einer verbesserten Darstellung des Hintergrundes führen wie am Beispiel des K_S^0 -Mesons sichtbar ist.

Eine weitere wichtige Erkenntnis ist, dass der Zerfall des η -Mesons ebenso dazu führt, dass die Variante, in der π^+ und π^- aus derselben Kollision sind, den Hintergrund besser beschreibt als die restlichen Möglichkeiten des Event Mixings¹. Für die verbesserte Darstellung durch diese Art des Event Mixing sind somit das $K_{\rm S}^0$ - sowie das η -Meson verantwortlich.

Der Zerfall des η' besitzt keine größere Auswirkung auf die Darstellung des Hintergrunds.

Abschließend ist anzumerken, dass es zu erwarten gewesen ist, dass sich die Möglichkeiten des Event Mixing, in denen π^+ und π^0 bzw. π^- und π^0 aus demselben Event stammen, überlagern, da es bei den relevanten Mesonen nur die geladenen ρ -Mesonen gab, welche für ein anderes Ergebnis hätten sorgen können. Für eine Bevorzugung einer der beiden Zerfälle gab es jedoch von vornherein keine physikalische Grundlage.

5.1.3. Korrelationen auf Grundlage von Jet-Zugehörigkeit

In dem Abschnitt 4.3 der Analyse ist sichtbar, dass es kein Indiz dafür gibt, dass Korrelationen auf Grundlage der Jet-Zugehörigkeit dafür sorgen könnten, dass das Event Mixing, bei dem π^+ und π^- aus demselben Event stammen, den Hintergrund am besten darstellt und sich von den Kombinationen π^+ und π^0 bzw. π^- und π^0 aus demselben Event unterscheidet. Es hat sich kein Muster ergeben, welches nahegelegt hätte, dass eine Kombination von zwei Pionen aus einem Jet überlegen gegenüber der anderen Möglichkeiten wäre. Es sei jedoch darauf hingewiesen, dass aus zeitlichen Gründen auch keine intensive Untersuchung möglich gewesen ist. So scheint es nicht unmöglich zu sein, dass auf dieser Grundlage Korrelationen auftreten, jedoch deuten Indizien aus Abschnitt 4.1 darauf hin, dass Korrelationen aufgrund von Zerfällen wahrscheinlicher sind und der Fokus deshalb auf diesen Teil der Arbeit gelegt wurde.

Folglich liefern die Beobachtungen des Abschnitts 4.3 lediglich einen ersten Überblick.

 $^{^1 \}mathrm{vgl.}$ Abbildung 4.11

5.2. Ausblick

Ein interessantes Thema für zukünftige Arbeiten in Bezug auf den Hintergrund wäre die Frage, wodurch es zu einer Überschätzung des Hintergrundes rechts des Peaks vom ω -Meson bzw. einer Unterschätzung links des Peaks kommt. In Abschnitt 4.1 ist als mögliche Erklärung bereits darauf verwiesen worden, dass bei einer reinen Betrachtung von Pionen aus dem ω -Zerfall mit zunehmender invarianter Masse M die Steigung abnimmt und rechts des Peaks keine weitere Zunahme erfolgt, sondern eine nahezu konstante Zahl an Einträgen erreicht zu werden scheint². Ob dies der Grund dafür ist, oder andere Gründe für dieses Verhalten verantwortlich sind, wäre eine interessante Fortsetzung, um den Hintergrund besser verstehen zu können.

In dem Unterabschnitt 5.1.1 ist darauf verwiesen worden, dass es weitere Zerfälle in Pionen gibt, welche nicht behandelt worden sind. Es ist somit denkbar, weitere Zerfälle auszuschalten, um möglicherweise ein noch besseres Verständnis des Hintergrunds zu erhalten. Die wichtigsten Zerfallskanäle zum Auffinden von Korrelationen sind jedoch bereits behandelt worden, wie aus Abbildung 4.11 hervorgeht. Dennoch ist auffallend, dass in dieser Abbildung das Event Mixing, bei dem alle Pionen aus verschiedenen Events stammen, signifikant schlechter ist als die übrigen Varianten des Event Mixings. Eine weitere Untersuchung scheint demnach denkbar.

Als weitere Fortführung dieser Arbeit wäre es interessant zu betrachten, ob die Unterscheidung zwischen dem Event Mixing, bei dem π^0 und π^+ aus derselben Kollision herrühren, und solcher, bei welcher π^0 und π^- aus demselben Event sind, bei eingeschaltetem ρ -Meson wirklich nur ein Zufall bzw. auf eine schlechte Skalierungsstelle zurückzuführen ist.

An anderen Stellen ist ein ähnliches Verhalten ebenso aufgefallen. Es wäre möglicherweise interessant die beiden Grundlagen zur Untersuchung des Hintergrundes zu überlagern. Das soll bedeuten, dass man zum Beispiel die Jet-Kinematik in Bezug auf das Ausschalten von Zerfällen beobachtet und Korrelationen untersucht. Dies wäre eine Mischung der beiden großen Themenkomplexe dieser Bachelorarbeit und würde möglicherweise zu neuen Erkenntnissen in Bezug auf den Hintergrund führen.

In Abschnitt 5.1.3 ist angedeutet worden, dass es aus zeitlichen Gründen notwendig gewesen ist, zu entscheiden auf welche Arten von Korrelationen der Fokus gelegt wird. Somit ist es möglich, sich intensiver mit Korrelationen auf Grundlage von Jet-Zugehörigkeit zu beschäftigen und diese näher zu analysieren. Zwar scheinen erste Abbildungen nicht auf solche hinzudeuten (vgl. Abschnitt 4.3), jedoch bietet es Spielraum für zukünftige Arbeiten.

Es sei abschließend angemerkt, dass die gewählte Art der Skalierung nicht die beste zu sein scheint, da es interessanter wäre, über einen Bereich anstatt an einem Punkt zu skalieren.

 $^{^2 \}mathrm{vgl.}$ Abbildung 4.6

A. Anhang

A.1. Abbildungen



Abbildung A.1.: Es stammen lediglich das π^- und das π^0 aus dem gleichen Event.



Abbildung A.2.: In diesem Diagramm stammen lediglich das π^+ und das π^- aus dem gleichen Event.



Abbildung A.3.: Es sind alle Pionen aus verschiedenen Events und eine Millionen Events durchgeführt worden.



Abbildung A.4.: Projektion des invarianten Massendiagramms, bei dem das π^0 und das π^- aus dem gleichen Event sind.



Abbildung A.5.: Projektion des invarianten Massendiagramm, bei dem das π^- und das π^+ aus dem gleichen Event stammen.



Abbildung A.6.: Projektion des Diagramms, bei welchem alle Pionen aus verschiedenen Events sind.



Abbildung A.7.: Projektion der invarianten Masse geteilt durch die jeweiligen Möglichkeiten des Event Mixings bei einer Skalierung an der Stelle $M_{\pi^0 \pi^+ \pi^-} = 0,70 \text{ GeV}/\text{c}^2.$



Abbildung A.8.: Projektion der invarianten Masse geteilt durch die jeweiligen Möglichkeiten des Event Mixings bei einer Skalierung an der Stelle $M_{\pi^0 \pi^+ \pi^-} = 0,85 \text{ GeV}/c^2.$

Abbildungsverzeichnis

2.1.	Übersicht relevanter Vektor- und pseudoskalerer Mesonen Darstellung kellidiorender Teilehenbündel bei einer inelestischen	7
2.2.	Stroupg	0
2.3.	Aufspaltung von \boldsymbol{p} in \boldsymbol{p}_T und \boldsymbol{p}_L	$\frac{9}{10}$
4.1.	Invariantes Massendiagramm für $\pi^+ \pi^- \pi^0$	20
4.2.	Invariantes Massendiagramm des Event Mixings für $\pi^+ \pi^0$ aus	
	gleichem Event	21
4.3.	Projektion des invarianten Massendiagramms	22
4.4.	Projektion des Event Mixings, bei dem π^0 und π^+ aus demselben	
	Event sind	22
4.5.	Invariantes Massendiagramm mit Pionen aus ω -Zerfall \ldots	23
4.6.	Projektion des invarianten Massendiagramms mit Pionen aus	
	ω -Zerfall	23
4.7.	Alle Projektionen bei einer Skalierung an der Stelle $M_{\pi^0\pi^+\pi^-} =$	
	$0,75 \mathrm{GeV/c^2}$	25
4.8.	SGBG/BG mit Skalierung bei $M_{\pi^0 \pi^+ \pi^-} = 0,75 \text{ GeV/c}^2$	26
4.9.	Alle Projektionen bei einer Skalierung an der Stelle $M_{\pi^0\pi^+\pi^-} =$	
	$0,80 \mathrm{GeV/c^2}$	28
4.10.	. SGBG/BG mit Skalierung bei $M_{\pi^0 \pi^+ \pi^-} = 0,80 \text{GeV}/\text{c}^2$	28
4.11.	. SGBG/BG ohne die Zerfälle von ϱ -Mesonen sowie von $K_{\rm S}^0$ -, η -	
	und eta' -Meson	30
4.12.	. SGBG/BG mit eingeschalteten Zerfällen von η	33
4.13.	. SGBG/BG mit eingeschalteten Zerfällen von K_S^0	34
4.14.	. SGBG/BG mit eingeschalteten Zerfällen von ρ^0 , ρ^+ und ρ^- .	36
4.15.	. SGBG/BG mit eingeschaltetem Zerfall von ρ^0	38
4.16.	. SGBG/BG mit eingeschalteten Zerfällen von ρ^+ und ρ^-	39
4.17	. SGBG/BG mit eingeschaltetem Zerfall von ρ^+	40
4.18.	. SGBG/BG mit eingeschalteten Zerfällen von η'	41
4.19.	. invariante Masse von π^+ und π^- aus dem gleichen Jet $\ldots \ldots$	43
4.20.	. invariante Massendiagramm von π^0 und π^- aus dem gleichen Jet	43
4.21.	. invariante Massendiagramm von π^0 und π^+ aus dem gleichen Jet	44
4.22.	. invariante Massendiagramm bei dem alle aus dem gleichen Jet sind	44
4.23.	. SGBG/BG für verschiedene Jet Konstellationen	46
A.1.	Invariantes Massendiagramm des Events Mixings für $\pi^-\pi^0$ aus	
	gleichem Event	53

A.2.	Invariantes Massendiagramm des Events Mixings für $\pi^+ \pi^-$ aus	
	gleichem Event	53
A.3.	Invariantes Massendiagramm des Event Mixings bei dem alle	
	Pionen aus verschiedenen Events sind	54
A.4.	Projektion des Event Mixings für $\pi^0 \pi^-$ aus gleichem Event	54
A.5.	Projektion des Events Mixings für $\pi^- \pi^+$ aus gleichem Event	55
A.6.	Projektion des Event Mixings, bei dem alle Pionen aus verschie-	
	denen Events sind	55
A.7.	SGBG/BG mit Skalierung bei $M_{\pi^0 \pi^+ \pi^-} = 0,70 \text{GeV/c}^2$	56
A.8.	SGBG/BG mit Skalierung bei $M_{\pi^0 \pi^+ \pi^-} = 0,85 \text{GeV/c}^2$	56

Tabellenverzeichnis

2.1.	Übersicht der verwendeten Einheiten.	3
2.2.	Übersicht von Wechselwirkungen und zugehörigen Austauschteil-	
	chen	4
2.3.	Übersicht und Eigenschaften der relevanten Quarks	5
2.4.	Übersicht der Massen, Lebensdauer und Zerfallskanäle der rele-	
	vanten Mesonen.	8

Literaturverzeichnis

- [1] Bogdan Povh et al.: Teilchen und Kerne. Eine Einführung in die physikalischen Konzepte, 9. Auflage, Berlin Heidelberg: Springer Spektrum, 2014
- [2] Weinheimer, Christian: Skript zur Vorlesung: Kern- und Teilchenphysik I, Westfälische Wilhelms-Universität, Münster: 2010
- [3] Nolting, Wolfgang: Grundkurs Theoretische Physik 5/2. Quantenmechanik-Methoden und Anwendungen, 8. Auflage, Berlin Heidelberg: Springer Spektrum, 2015
- [4] Nolting, Wolfgang: Grundkurs Theoretische Physik 5/1. Quantenmechanik-Grundlagen, 8. Auflage, Berlin Heidelberg: Springer Spektrum, 2013
- [5] Masse der Pionen sowie Masse und Zerfälle vom η-, η'-, ωund ρ-Meson, Webseite: http://pdg.lbl.gov/2016/tables/ rpp2016-tab-mesons-light.pdf

zuletzt eingesehen am 08.09.2017

- [6] Masse und Zerfälle der verschiedenen K-Mesonen, Webseite: http://pdg. lbl.gov/2016/tables/rpp2016-tab-mesons-strange.pdf zuletzt eingesehen am 08.09.2017
- [7] Klein-Bösing, Christian: Ultra-Relativistic Heavy-Ion Collisions: Quarks, Gluons and the Quark-Gluon Plasma, Westfälische Wilhelms-Universität, Münster: SS 2016
- [8] Nolting, Wolfgang: Grundkurs Theoretische Physik 4. Spezielle Relativitätstheorie, Thermodynamik, 8. Auflage, Berlin Heidelberg: Springer Spektrum, 2012
- [9] Kernphysikvorlesung von Professor Santo, Webseite: http://www. uni-muenster.de/Physik.KP/santo/thesis/diplom/buschin/node34. html zuletzt eingesehen am 20.09.2017
- [10] Informationen zum ALICE-Experiment, Webseite: http://aliceinfo. cern.ch/Public/Welcome.html zuletzt eingesehen am 13.09.2017
- [11] Informationen zur Funktionsweise von pythia, Webseite: http://home.thep. lu.se/~torbjorn/pythia81html/Welcome.html zuletzt eingesehen am 20.09.2017
- [12] Khoukaz, Alfons: Vorlesung zu KT2, Westfälische Wilhelms-Universität, Münster: 2012/13