



Untersuchung der Produktion identifizierter Teilchen in partonischen Prozessen am LHC

Bachelorarbeit
im Studiengang Physik

vorgelegt von
Alexander Terbeck

Datum: 7. Oktober 2019

Erstgutachter: Prof. Dr. Christian Klein-Bösing
Zweitgutachter: Prof. Dr. Anton Andronic

Inhaltsverzeichnis

1	Einführung	1
2	Theoretische Grundlagen	2
2.1	Das Standardmodell	2
2.2	QCD und QGP	4
2.3	Relativistische Kinematik	6
3	Experimentelle Umgebung	8
3.1	Large Hadron Collider	8
3.1.1	ALICE	10
3.2	Software	11
3.2.1	PYTHIA	11
3.2.2	Fastjet	12
3.2.3	ROOT	12
4	Analyse	13
4.1	PYTHIA Einstellungen	13
4.1.1	Statistischer Fehler	13
4.1.2	Minimum Bias	13
4.1.3	Parametereinstellungen	14
4.2	Mesonen mit und ohne Strangeness	14
4.2.1	Unterschiedliche Referenzteilchen	16
4.3	Transversale Masse	18
4.4	Einfluss nach Jet	20
4.5	Einfluss des Radius am Beispiel von geladenen Jets	22
4.6	Einfluss der QCD Prozesse	25
4.6.1	Gluon-Gluon zu Gluon-Gluon	26
4.6.2	Gluon-Gluon zu Quark-Antiquark	27
4.6.3	Quark-Gluon zu Quark-Gluon	29
4.6.4	Quark-Quark' zu Quark-Quark'	31
4.6.5	Teilprozesse	33
5	Zusammenfassung	36

1 Einführung

Experimente an Teilchenbeschleunigern zählen zu den wichtigsten Quellen zur Entdeckung von neuen physikalischen Phänomenen. Hierbei werden Atomkerne, Nukleonen oder Leptonen auf nahezu Lichtgeschwindigkeit beschleunigt und zur Kollision gebracht. Die hierfür benötigten Maschinen sind in riesigen Forschungskomplexen wie dem CERN vorhanden. Die Suche nach neuen Teilchen und neuer Physik steht dabei im Vordergrund.

Diese gestaltet sich allerdings als schwierig, da die Experimente über die Jahrzehnte immer größer und komplexer geworden sind. Aufgrund dessen wurden Programme geschrieben, mit denen Simulationen durchgeführt werden konnten, welche die Teilchensuche erleichterten. Diese Simulationsprogramme besitzen ein reichhaltiges Inventar an Einstellungen und Funktionen. Es ist möglich, unterschiedliche Manipulationen an der Physik zu simulieren oder ganz neue Teilchen erzeugen zu lassen.

Ziel dieser Bachelorarbeit ist es, zu untersuchen, inwieweit die unterschiedlichen Teilreaktionen einer Proton-Proton-Kollision Auswirkungen auf die Gesamtreaktion haben. Auch werden weitere Einstellungen untersucht, wie die Auswirkungen eines Jets und die des Jetradius. Ein Jet ist hierbei ein enger Kegel von Hadronen, welcher aus der Teilchenkollision entstehen.

Dazu wurden in dieser Bachelorarbeit Proton-Proton-Kollisionen mit einer Schwerpunktsenergie von 8,0 TeV simuliert und die Impulsspektren der produzierten Teilchen in Relation zu Pionen und Kaonen gesetzt.

Zu Beginn dieser Arbeit werden physikalische Grundlagen erklärt. Darauf folgt eine kurze Darstellung des *Large Hadron Collider Teilchenbeschleunigers (LHC)* am CERN (Europäische Organisation für Kernforschung) und des Detektors *A Large Ion Collider Experiment (ALICE)*. Anschließend wird ein Überblick über die verwendete Software gegeben, bevor die eigentliche Simulation vorgestellt wird. Nach der Darlegung der Voreinstellungen von *PYTHIA* werden die unterschiedlichen Teilchenspektren aufgeführt. Es wird nach dem Einfluss von Jets, Ladungen und Jetradien untersucht. Darauf folgend werden die Auswirkungen der unterschiedlichen QCD Prozessen analysiert. Zum Schluss wird ein Fazit zu den Ergebnissen präsentiert.

2 Theoretische Grundlagen

Um ein besseres Verständnis für die vorliegende Arbeit zu erhalten, werden zu Beginn einige Grundlagen geklärt. Nach einer Betrachtung der theoretischen Grundlagen der Teilchenkollisionen am Large Hadron Collider wird das Experiment ALICE und die verwendete Software vorgestellt.

2.1 Das Standardmodell

Mit dem Standardmodell der Teilchenphysik besitzt man eine Theorie, mit der sich der Welt physikalisch beschreiben lässt. Es besteht aus den bekannten Elementarteilchen und drei der vier fundamentalen Wechselwirkungen. Dabei lassen sich mit nur drei Sorten elementarer Teilchen, den Quarks, Leptonen und Austauschteilchen, sämtliche Materieteilchen und Wechselwirkungen beschreiben. Die physikalische Grundlage des Standardmodells ist die Quantenfeldtheorie, auf die in dieser Arbeit allerdings nicht näher eingegangen wird [1].

Fermionen Unter Fermionen, auch Materieteilchen genannt, versteht man Teilchen mit halbzahligem Spin. Diese Teilchen sind wiederum in Quarks und Leptonen unterteilt. Sie sind die kleinsten uns bekannten Teilchen und werden damit als unteilbar und elementar interpretiert [2].

Quarks sind die Bausteine der Hadronen, zu welchen unter anderem das Proton und Neutron gehören. Sie unterliegen dabei allen vier uns bekannten Wechselwirkungen, auf die später noch eingegangen wird. Die Quarktypen werden als *Flavours* (engl. *flavour* = *Geschmack*) bezeichnet und heißen u (*up*), d (*down*), s (*strange*), c (*charm*), b (*bottom*), t (*top*) [2].

Quarks und Leptonen sind in jeweils drei "Familien" oder "Generationen" angeordnet, wie in Tabelle 1 zu sehen ist.

Tabelle 1: Die sechs unterschiedlichen Quarks und Leptonen.

Fermion	Familie			elektrische Ladung	Spin	Farbladung
	1	2	3			
Quarks	<i>u</i>	<i>c</i>	<i>t</i>	+2/3	1/2	r,b,g
	<i>d</i>	<i>s</i>	<i>b</i>	-1/3	1/2	r,b,g
Leptonen	<i>e</i>	μ	τ	-1	1/2	-
	ν_e	ν_μ	ν_τ	0	1/2	-

Die Leptonen hingegen unterliegen nicht der starken Wechselwirkung. Zu ihnen zählt das *e* (*Elektron*), μ (*Myon*), τ (*Tauon*), sowie die Neutrinos ν_e (*Elektron-Neutrino*), ν_μ (*Myon-Neutrino*), ν_τ (*Tauon-Neutrino*) [1].

Die Massen der Quarks und Leptonen nehmen dabei mit jeder Generation zu. Auch besitzen sie, mit Ausnahme der Neutrinos, eine elektrische Ladung, welche bei den Quarks drittelzählig ist, während sie bei den Leptonen ganzzahlig ist. Eine Farbladung, welche zur Beschreibung der starken Wechselwirkung gebraucht wird, ist nur bei den Quarks vorhanden. Des Weiteren ist anzumerken, dass Quarks nur in gebunden Zuständen auftreten und niemals allein. Dasselbe gilt für die Farbladungen. Auch diese kommen nicht eigenständig vor, sie sind immer so in den Teilchen vorhanden, dass nach außen hin Farbneutralität herrscht. Dies wird als

Confinement bezeichnet. Der Grund hierfür liegt bei der starken Wechselwirkung und der Äquivalenz von Masse und Energie. Diese ist so stark, dass bei einem versuchten Zerreißen von Hadronen so viel Energie aufgewendet werden müsste, dass neue Materie entstehen würde [2].

Hadronen Als Hadronen werden subatomare Teilchen bezeichnet, die aus Quarks aufgebaut sind und durch die starke Wechselwirkung zusammengehalten werden. Sie werden in *Mesonen* mit ganzzahligen Spin und *Baryonen* mit halbzahligen Spin unterteilt [2].

Baryonen Alle Baryonen bestehen aus drei Quarks. Da diese Spin-1/2-Teilchen sind, besitzen Baryonen immer einen halbzahligen Spin. Zusätzlich ist zu beachten, dass die einzelnen angeregten Zustände eine Energie- und Massendifferenz in Höhe der Nukleonenmasse besitzen, sodass diese Zustände als eigenständige Teilchen, sogenannte *Resonanzteilchen*, mit entsprechender Lebensdauer angesehen werden können [2].

Für diese Arbeit relevant sind:

$$\begin{array}{lll} \text{Proton} & p & = |uud\rangle \\ \text{Antiproton} & \bar{p} & = |\bar{u}\bar{u}\bar{d}\rangle \\ \text{Lambda-Baryon} & \Lambda & = |uds\rangle \end{array}$$

Mesonen Mesonen wiederum bestehen aus zwei Quarks, einem Quark-Antiquark-Paar. Deswegen ist auch der Spin immer ganzzahlig. In dieser Arbeit werden folgende elektrisch geladene und ungeladene Mesonen betrachtet:

$$\begin{array}{lll} \text{Pion (positiv)} & \pi^+ & = |u\bar{d}\rangle \\ \text{Pion (negativ)} & \pi^- & = |d\bar{u}\rangle \\ \text{Pion (neutral)} & \pi^0 & = \frac{1}{\sqrt{2}}|u\bar{u} - d\bar{d}\rangle \\ \text{Kaon (positiv)} & K^+ & = |u\bar{s}\rangle \\ \text{Kaon (negativ)} & K^- & = |s\bar{u}\rangle \\ \text{Kaon (neutral)} & K^0 & = |d\bar{s}\rangle \\ \text{Eta-Meson} & \eta & = \frac{1}{\sqrt{6}}|u\bar{u} + d\bar{d} - 2s\bar{s}\rangle \end{array}$$

Das η Teilchen ist hierbei ein Mischzustand aus $|u\bar{u}\rangle$, $|d\bar{d}\rangle$, $|s\bar{s}\rangle$ mit passender Normierung.

Bosonen und fundamentale Wechselwirkungen Heutzutage kennen wir, neben der Gravitation, drei fundamentale Wechselwirkungen. Vermittelt werden sie durch den Austausch von Vektorbosonen, auch Austauschteilchen genannt. Diese Elementarteilchen besitzen einen Spin 1 und sind mit den Wechselwirkungen in Tabelle 2 abgebildet.

Tabelle 2: Die vier fundamentalen Wechselwirkungen und deren Austauschteilchen.

Wechselwirkung	koppelt an	Austauschteilchen
stark	Farbladung	8 Gluonen
schwach	schwache Ladung	W^+ , W^- , Z^0
elektro-magnetisch	elektrische Ladung	1 Photon
Gravitation	Masse	Unbekannt

Die *Gravitation* ist die Anziehungskraft zwischen Massen und wird durch die allgemeine Relativitätstheorie beschrieben. Sie wird in dieser Arbeit nicht weiter behandelt, da die Kraft zu schwach für relevante Auswirkungen ist.

Die *Elektromagnetische Wechselwirkung* wird durch das Photon als Austauschteilchen beschrieben. Sie ist für viele alltägliche Phänomene, wie Licht, Elektrizität, Magnetismus und chemischen Bindungen zuständig und wird in der *Quantenelektrodynamik (QED)* beschrieben.

Die *schwache Wechselwirkung* tritt unter anderem bei dem β -Zerfall auf. Hierbei werden Quarkflavour umgewandelt. Ein Beispiel ist der β^- -Zerfall $n \rightarrow p + e^- + \bar{\nu}_e$, bei dem ein Neutron in ein leichteres Proton, ein Elektron und ein Elektron-Antineutrino umgewandelt wird. Die hierfür verantwortlichen Teilchen sind das W- und das Z^0 -Boson. Mit dem W-Boson werden die Reaktionen beschrieben, bei denen Ladungen geändert werden, während mit dem Z-Boson die ladungsneutralen Reaktionen ausgeführt werden [1].

Aufgrund der *starken Wechselwirkung* werden die Quarks in der Form von Hadronen zusammengehalten. Dabei ist die Stärke dieser Kraft auf kurzer und mittlerer Distanz bis ungefähr 2 fm stärker als die Coulombkraft. Auch der Prozess der starken Wechselwirkung wird als Austausch von Teilchen interpretiert. In diesem Fall sind es die Gluonen (engl. *to glue = kleben*). Diese koppeln an die Farbladung der einzelnen Quarks. Dabei darf man sich die Farbladung nicht als visuelle Farbe vorstellen, sondern als Eigenschaft der Teilchen. Die existierenden Farben Rot, Grün, Blau sind an der Farblehre angelehnt. Die weitere theoretische Beschreibung wird als *Quantenchromodynamik* bezeichnet [2].

2.2 QCD und QGP

Quantenchromodynamik Die Quantenchromodynamik (QCD) beschreibt die starke Wechselwirkung durch die Interaktion von Gluonen und Quarks. Diese tragen gleichzeitig eine Farbladung und eine Antifarbladung. Die Anzahl der Farben kann nach dem Grad der Eichgruppe $SU(3)$ bestimmt werden. Nach dieser bilden die 3×3 Farbkombinationen zwei Multipletts von Zuständen, ein Singulett und ein Oktett. Mit einem System von Basiszuständen, welche aus den Zuständen des Oktetts gebildet werden, können nun alle Farbzustände aufgebaut werden. Eine Besonderheit der QCD ist die Möglichkeit der Gluonen, untereinander wechselwirken zu können.

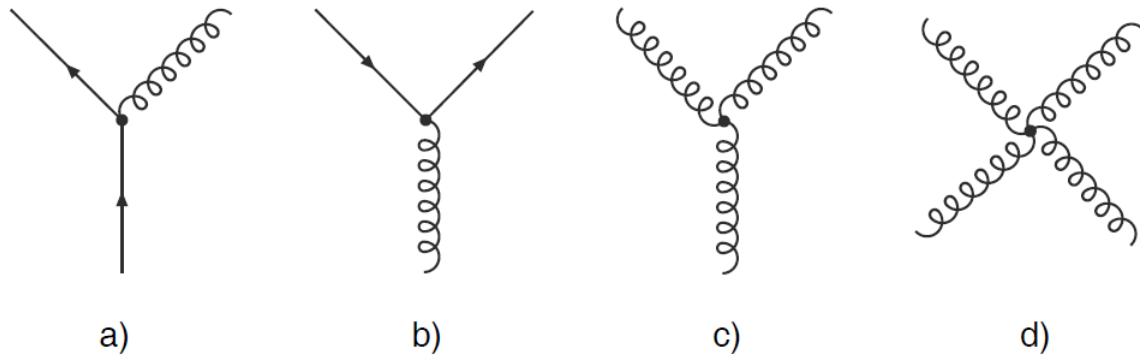


Abbildung 1: Feynman-Diagramme der unterschiedlichen Interaktionsmöglichkeiten der Gluonen. (a) Abstrahlung eines Gluons von einem Quark, (b) Aufspaltung eines Gluons in ein Quark-Antiquark-Paar und (c), (d) zwei Möglichkeiten der Selbstkopplung der Gluonen [2].

Quark-Gluon-Plasma Das Quark-Gluon-Plasma (QGP) ist ein Zustand, in dem sich Quarks und Gluonen quasi-frei in einem Volumen bewegen können. Für die Entstehung muss die Dichte oder die Energie innerhalb dieses Volumen stark steigen. Es muss auf das Zehnfache der normalen Dichte verdichtet werden, damit die einzelnen Nukleonen überlappen und damit aufhören, als einzelne Teilchen zu existieren. Die Energie ist hierbei so hoch, dass das *Confinement* aufgehoben ist, und es zu quasi-freien Teilchen kommt. In der Phase des QGP werden die meisten gebundenen Hadronenzustände verhindert, sodass bei einer direkten Beobachtung dieser Phase auf elektromagnetische Strahlung zurückgegriffen werden muss. Der ungehinderte Austritt der elektromagnetischen Strahlung ist deswegen möglich, da die Kopplung von Photonen an Quarks um zwei Größenordnungen kleiner ist, als die stark wechselwirkende Materie. In relativistischen Schwerionenstößen ist dies möglich.

Streuung Die wichtigste Methode, um Erkenntnisse in der Kern- und Teilchenphysik zu erhalten, sind die Streuexperimente. Bei diesen kann umfangreiches Wissen über den Aufbau der Atomkerne und die verschiedenen Wechselwirkungen erhalten werden. Bei solchen Experimenten wird mit einer festgelegten Energie entweder ein Strahl von Teilchen auf ein Zielobjekt (engl. Target) geschossen oder es werden zwei Teilchenstrahlen gegeneinander geschossen. Die interessanten Messdaten von den Reaktionsprodukten sind unter anderem die Energie, die Ladung und der Winkel relativ zu der Einfallsrichtung des Teilchenstrahls. Es sind grundsätzlich zwei unterschiedliche Streuungen zu unterscheiden. Bei der *elastischen Streuung* sind die Teilchen vor und nach der Streuung identisch. Das beschossene Target ändert seine kinetische Energie und seinen Impuls, der gemessene Winkel ist ebenfalls von Bedeutung.

Inelastische Streuungen werden diejenigen Reaktionen genannt, bei denen es zu Energieverlusten unter den gestreuten Teilchen kommt. Dabei können diese zerbrechen und neue Teilchen bilden. Es wird erkennbar, dass es sich hierbei eigentlich um eine elastische Streuung an den Partonen handelt. Diese bewegen sich aufgrund der Streuung auseinander und bilden auf Basis des Confinements neue Teilchen. Somit ist es möglich, dass nach einer inelastischen Streuungen neue Teilchen entstehen können. In Abbildung 2 sind die unterschiedlichen Streuprozesse dargestellt [2].

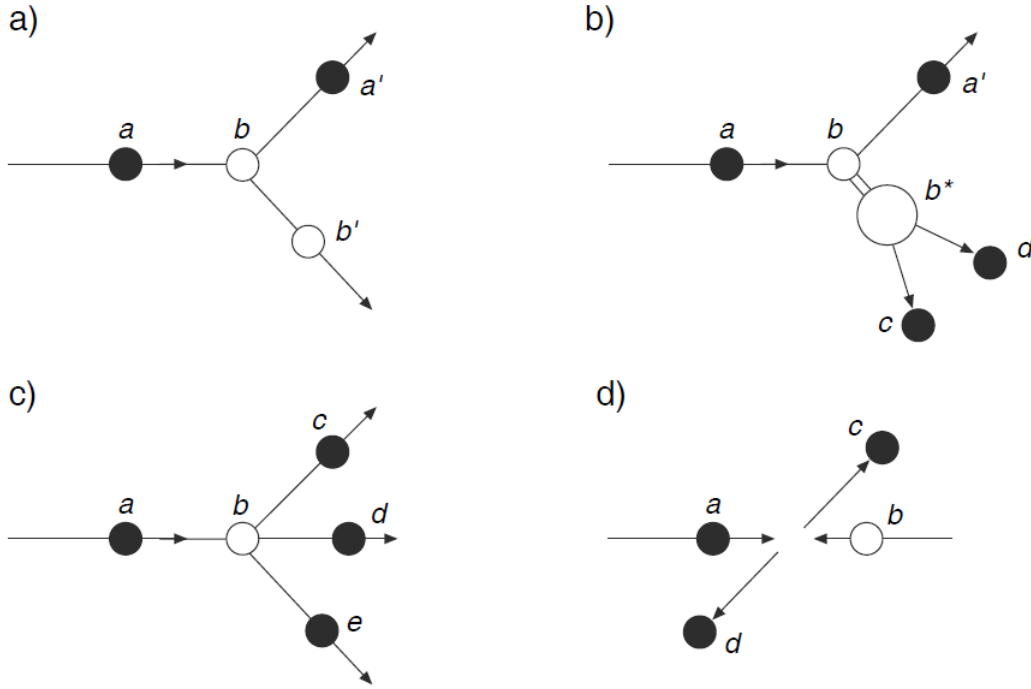


Abbildung 2: Verschiedene Möglichkeiten der Streuung von zwei Körpern: (a) elastische Streuung; (b) inelastische Streuung, bei dem ein angeregter Zustand entsteht; (c) inelastische Streuung bei der neue Teilchen entstehen; (d) Reaktion zweier kollidierender Strahlen [2].

2.3 Relativistische Kinematik

Invariante Masse Bei der Untersuchung von ultra-relativistischen Schwerionenkollisionen ist es hilfreich, invariante kinematischen Variablen zu benutzen. Dies erfolgt mit den *Vierervektoren* der speziellen Relativitätstheorie.

$$P^\mu = (E, \vec{p}) = (E, p_x, p_y, p_z). \quad (1)$$

Hierbei ist E die Energie und $\vec{p}$ der dreidimensionale Impuls des Teilchens. Mit *invarianter Masse* m_{inv} wird das Betragsquadrat des Viererimpulses bezeichnet und ist deshalb interessant, da er invariant unter Lorentztransformation ist. Dies bedeutet, dass z. B. die invariante Masse in allen Bezugssystemen gleich bleibt.

$$m_{inv}^2 = P^2 = P^\mu P_\mu = E^2 - \vec{p} \cdot \vec{p}. \quad (2)$$

Hierbei ist zu beachten, dass die invariante Masse bei freien Teilchen identisch ist mit der Ruhemasse m_0 [3].

Schwerpunktenergie Ein weiteres wichtiges Charakteristikum ist die *Mandelstam Variable* s .

$$s = (P_1 + P_2)^2 \quad (3)$$

Sie ist die quadratische Summe der Viererimpulse von zwei kollidierenden Teilchen. Die Wurzel aus ihr wird als Schwerpunktsenergie $\sqrt{s}$ bezeichnet. Im Rahmen dieser Bachelorarbeit wurde angenommen, dass zwei identische Teilchen mit dem selbem Impuls aufeinander geschossen wurden, sodass gilt $m_1 = m_2$ und $p_1 = -p_2$ [3].

Hiermit ergibt sich

$$\sqrt{s} = \sqrt{\left(\begin{pmatrix} E \\ p_x \\ p_y \\ p_z \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} E \\ -p_x \\ -p_y \\ -p_z \end{pmatrix} \right)^2} = \sqrt{\begin{pmatrix} 2E \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}^2} = 2E. \quad (4)$$

Transversalimpuls Der Transversalimpuls p_T ist ebenfalls eine wichtige Größe, welcher die Impulskomponente des Impulses transversal zur Strahlenachse angibt. Diese wird standardmäßig als z-Richtung festgelegt, sodass $p_T = p \cdot \sin(\vartheta)$ geschrieben werden kann. Hierbei ist p der Betrag des Impulses $\vec{p}$ und ϑ der Winkel zur Strahlachse. Der Transversalimpuls ist invariant unter Lorentztransformation entlang der z-Achse [3].

Rapidity und Pseudorapidity Die Rapidity y ist ein alternatives Maß der Geschwindigkeit für bewegte Körper, welche additiv unter Lorentztransformation ist.

$$y = \frac{1}{2} \ln \left(\frac{E + p_L}{E - p_L} \right) \quad (5)$$

Mit der Näherung $E \gg m_0$ kann die *Pseudorapidity* mit

$$\eta = -\ln \left[\tan \left(\frac{\vartheta}{2} \right) \right] \quad (6)$$

angegeben werden. Diese gibt Winkel relativ zur Strahlenachse an. Hierbei wird nur die longitudinale Komponente der Geschwindigkeit betrachtet. In Abbildung 3 ist die Pseudorapidity zusammen mit dem Polarwinkel dargestellt [3, 4].

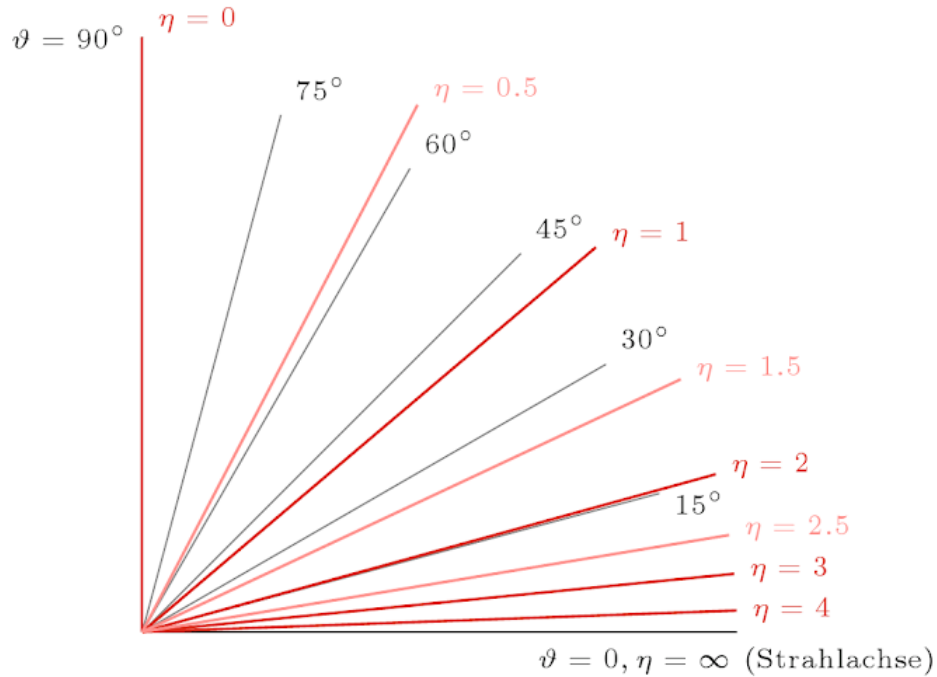


Abbildung 3: Darstellung der Pseudorapidität. η beträgt bei einem Winkel von 90° null. Falls der Winkel einen Wert von 0° hat, beträgt η unendlich und der Vektor liegt in der Ebene parallel zur Strahlenachse [4].

Die Pseudorapidität wird in der Teilchenphysik bevorzugt verwendet, da sie einen Winkel angibt. Diesen Winkel kann man in den Detektoren der Teilchenbeschleunigern bestimmen.

Jets Bei einem Streuexperiment kann es vorkommen, dass sich einzelne Quarks oder Gluonen aus dem Confinement lösen. Diese tragen eine Farbladung und können aufgrund des Confinement nicht dauerhaft existieren. In der starken Wechselwirkung steigt das Potential mit steigendem Abstand stark an, sodass bald neue Teilchen mit Farbladung erzeugt werden können. Somit bleibt die Farbneutralität erhalten. Hierbei kommt es zu einer *Hadronisierung*, da eine große Anzahl an Hadronen aus den Partonen entsteht. Das entstehende Bündel aus Teilchen nennt sich *Jet*. Diese *Jets* treten vor allem in QCD Prozessen auf, die durch hohe Transversalimpulse zustande gekommen sind. Die *Jets* werden anschließend als Näherung des ursprünglich gestreuten Partons angesehen, sodass sie eine Energie und einen Transversalimpuls p_T besitzen [1, 2].

3 Experimentelle Umgebung

3.1 Large Hadron Collider

Der Large Hadron Collider (LHC) ist ein Synchrotron-Beschleuniger und ist Teil des Forschungsinstitut CERN (Europäische Organisation für Kernforschung) in der Schweiz. Mit einem Umfang von 27 km ist er der Größte der Welt. Errichtet wurde der LHC vor allem, um das *Higgs-Boson* zu finden und Physik jenseits des Standardmodells zu entdecken. Es werden

Protonen mit einer Schwerpunktsenergie von bis zu 7 TeV oder Bleikerne mit bis zu 5 TeV zur Kollision gebracht.

Die Teilchen werden dazu durch supraleitende Magneten, bei extrem niedrigen Temperaturen entgegengesetzt beschleunigt und kreuzen sich an festgelegten Punkten. Die Teilchen sind dabei zu kleinen Bündeln zusammengefasst und werden daher *Bunches* genannt. Ungefähr 3000 Bunches sind in jedem der beiden Teilchenstrahlen enthalten, wobei jeder Bunch ca. 100 Milliarden Protonen umfasst. Die Protonen sind allerdings sehr klein, sodass die Wahrscheinlichkeit einer Kollision sehr gering ist. Da die Bunches über eine so hohe Geschwindigkeit verfügen, kommt es zu bis zu 45 Millionen bunch crossings pro Sekunde, wobei jeweils nur eine geringe Anzahl von Kollisionen stattfindet.

Für die Steuerung des Experimentes werden Magneten benutzt. Dipolmagneten werden verwendet, um die Bunches auf der Kreisbahn zu halten, während Quadrupolmagnete zum Fokussieren eingesetzt werden [11].

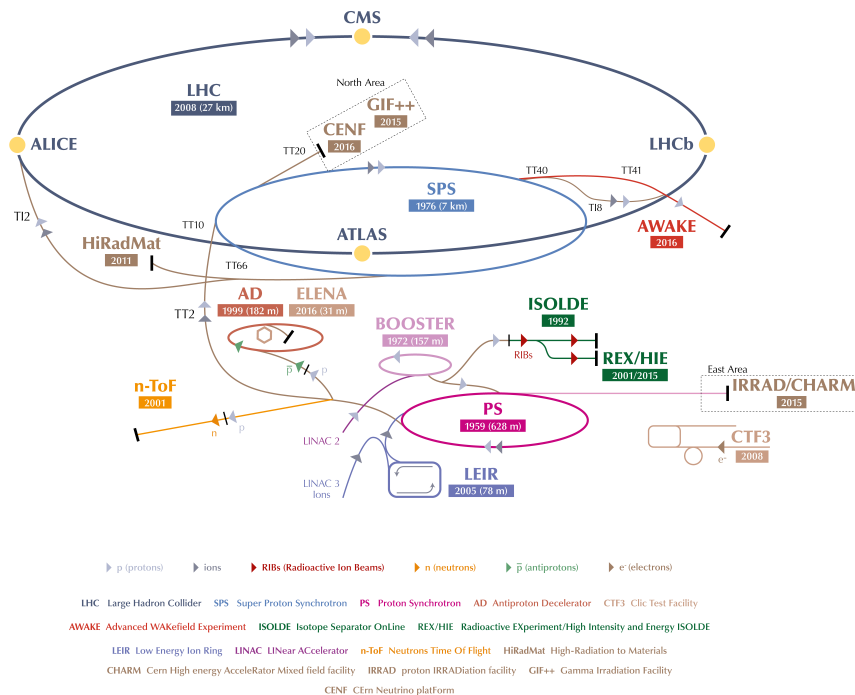


Abbildung 4: Schematischer Aufbau der Beschleuniger des CERNs [12].

In Abbildung 4 ist ein Schema des CERN Forschungskomplexes dargestellt. Um eine Beschleunigung an dem LHC durchführen zu können, müssen die Teilchen schrittweise vorbeschleunigt werden. Zuerst werden die Teilchen mit dem Linearbeschleuniger LINAC2 auf eine Energie von 50 MeV gebracht. Von dort aus werden sie durch die Synchrotrone *Proton Synchrotron Booster*, *Proton Synchrotron* (PS) und *Super Proton Synchrotron* (SPS) auf eine Energie von 450 GeV beschleunigt. Mit dieser Energie können die Teilchen nun in den LHC injiziert werden und erreichen dort eine Energie von bis zu 7 TeV.

Am LHC sind vier große Detektoren installiert, ALICE, ATLAS, CMS und LHCb. In dieser Bachelorarbeit ist vor allem ALICE von Bedeutung, da dies für die Untersuchung von stark wechselwirkenden Teilchen bei extremen Energiedichten erstellt wurde. Diese Energiedichten können mittels Blei-Blei-Kollisionen geschaffen werden [3].

3.1.1 ALICE

ALICE steht für *A Large Ion Collider Experiment* und ist 25 m lang, 16 m breit und 10000 t schwer. Dieser Detektor wurde vorwiegend konstruiert, um anhand von Blei-Blei-Kollisionen das entstehende Quark-Gluon-Plasma zu untersuchen [13].

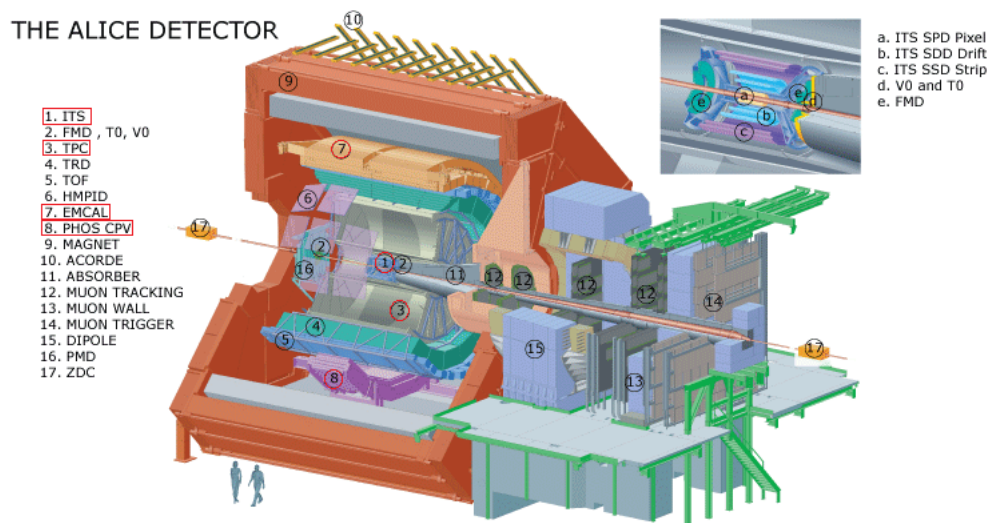


Abbildung 5: Aufbau des ALICE Experimentes. Die hier relevanten Konstruktionen sind rot markiert [16].

Das Experiment ist aus mehreren Schichten von Detektoren zusammengesetzt. Dabei wird unter anderem zwischen dem Tracking System und den Kalorimetern unterschieden. Ersteres ist für die Rekonstruktion der Flugbahnen zuständig, während letzteres für die Energiebestimmung eingesetzt wird.

Tracking System Diese Detektoren dienen vor allem der räumlichen Lokalisierung der Teilchen. Die für diese Arbeit wichtigen Detektoren sind das *ITS* und die *TPC*. Das *Inner Tracking System (ITS)* befindet sich am dichtesten an der Teilchenkollision. Es besteht aus sechs Schichten von Siliziumdetektoren, welche zylindrisch um das Strahlrohr aufgestellt sind. Diese sind Halbleiterdetektoren, was dazu führt, dass die einfallenden Teilchen Elektronen-Loch-Paare erzeugen, welcher wiederum messbaren Strom erzeugen. Dadurch sind Messungen von geladenen Teilchen möglich, die einen Impuls von unter 200 MeV besitzen [5]. Die *Time-Projection-Chamber (TPC)* ist einer der wichtigsten Detektoren am ALICE und der Haupttrackingdetektor. Er besteht aus einem Hohlzylinder, welcher 5,1 m lang ist und einen Durchmesser von 5,56 m hat. Er ist mit einem speziellem Gasmischung von 90 % Neon

und 10 % Kohlenstoffdioxid gefüllt, welches ein Volumen von ca. 90 m^3 besitzt. Eine Elektrode befindet sich in der Mitte dieses Zylinders, die zusammen mit den positiv geladenen Endkappen ein elektrisches Feld erzeugen. Die durch die Beamkollisionen entstandenen Teilchen, die durch das Gas fliegen, ionisieren nun das Gas. Das heißt, sie schlagen Elektronen aus den Atomhüllen, welche anschließend zu den Randkappen wandern und dort detektiert werden. Die TPC ist in Zusammenarbeit mit dem ITS das wichtigste Instrument zur Vertexbestimmung. Dabei wird mit Primärvertex der Kollisionspunkt bezeichnet und mit Sekundärvertex ein nachfolgender Teilchenzerfall [5, 15].

Kalorimeter Die Kalorimeter dienen im ALICE zur Messung der Teilchenenergien. Dafür werden unterschiedliche Systeme verwendet, hier von besonderer Relevanz sind das *EMCal* und das *PHOS*. Das *Electromagnetic Calorimeter (EMCal)* ist ein Pb-Szintillator. Hier sind Absorbermaterial (Pb) und Szintillator in 77 Schichten übereinander vorhanden. Falls nun Elektronen oder Photonen in diesen toten Bleibereichen eintreten, entstehen Teilchenschauer, welche in den Szintillator detektiert werden können. Dabei ist zu beachten, dass bei den Teilchenschauern Elektronen ihre komplette Energie verlieren, während es bei Hadronen nur einen Bruchteil der Energie ist [9, 10].

Mit dem *Photon Spectrometer (PHOS)* können hochauflösend Photonen detektiert werden. Der Detektor besteht aus vielen dichten Blei-Wolfram Kristallen, wodurch keine toten Bereiche entstehen. Die Auflösung ist wesentlich besser als bei dem *EMCal*, allerdings ist die Akzeptanz geringer [14, 15].

3.2 Software

3.2.1 PYTHIA

Mit *PYTHIA* werden hochenergetischen Teilchenkollisionen simuliert. Dieses in C++ geschriebenes Programm kann eine Variation von unterschiedlichen Ereignissen wie elastischen und inelastischen Streuungen oder Zerfällen etc. simulieren. Dabei können unterschiedliche Teilchen wie e^- , e^+ , p oder $\bar{p}$ zum Zusammenstoßen gebracht werden. Aufgrund der vielen ehemaligen Teilchenbeschleunigerversuchen konnte man mit den hieraus gewonnenen Daten Modelle entwickeln, die realistische Simulationen ermöglichen. Mit einer Monte-Carlo-Simulation können mit diesen Daten nun Events, also Teilchenkollisionen, simuliert werden, die der Realität sehr nahe kommen. Auch kann eine Vielfalt an Modifikationen implementiert werden, wie die Art der Teilchen, die kollidieren, die Schwerpunktsenergien, die Reaktionswege oder es können ganze physikalische Phänomene ausgeschaltet werden. Eine Motivation dieser Simulation ist unter anderem, Hinweise auf neue Teilchen zu finden. Dabei können Parameter wie z. B. mögliche Zerfallskanäle von hypothetischen Teilchen in *PYTHIA* hineingeschrieben werden, sodass man bei einer nachfolgenden Simulation wichtige Hinweise erhält, zu welchen Energie- und Impulsänderungen es bei den Endprodukten kommt. Somit kann man bei einer realen Messung an einem Teilchenbeschleuniger die Detektoren auf genau diese Daten optimieren [6].

3.2.2 Fastjet

Fastjet 3.3.2 ist ein in C++ geschriebenes Paket, mit dem Jets gefunden und rekonstruiert werden können. Es beinhaltet verschiedene sequentielle Rekombinations-Clustering-Algorithmen, sowie unterschiedliche Cone Jet Finder und Werkzeuge um Jets zu manipulieren [7].

Radius Wie in Abbildung 6 zu sehen ist, können die rekonstruierten Jets als kegelförmig approximiert werden. Sie decken daher einen Raumwinkel um das ursprüngliche Parton ab, welcher mit dem Radius beschrieben wird. Dieser Radius lässt sich aus den Algorithmen bestimmen und beschreibt die räumliche Koordinate des Jets in der $\eta - \phi$ -Ebene. Die Formel hierfür ist mit $\Delta R = \sqrt{(\Delta\phi)^2 + (\Delta\eta)^2}$ gegeben [3].

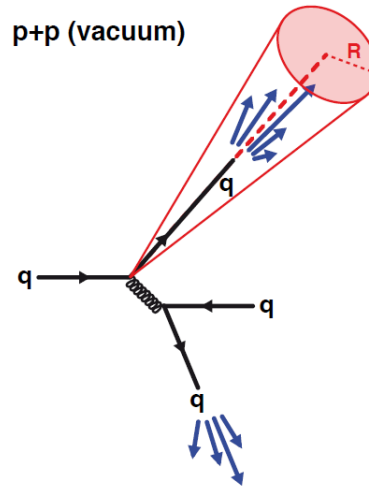


Abbildung 6: Darstellung der Jetrekonstruktion anhand einer harten Streuung eines Quarks in einer pp-Kollision [3].

3.2.3 ROOT

ROOT ist ein vom CERN erstelltes Programm, mit welchem die simulierte Teilchenkollision aufgenommen und analysiert werden können. Es besitzt hierbei eine große Anzahl an Funktionen mit denen die Daten aus *PYTHIA* ausgewertet werden können. Das Plotten und Fitten von Messdaten, die Berechnung von Vierervektoren oder eine statistische Datenanalyse sind alles Operationen, die mit *ROOT* durchgeführt werden können [8].

4 Analyse

Im Folgenden wird die Analyse betrachtet. Dazu wird zuerst ein kurzer Überblick über die Einstellungen gegeben, bevor die einzelnen Teilchenspektren genauer untersucht werden.

4.1 PYTHIA Einstellungen

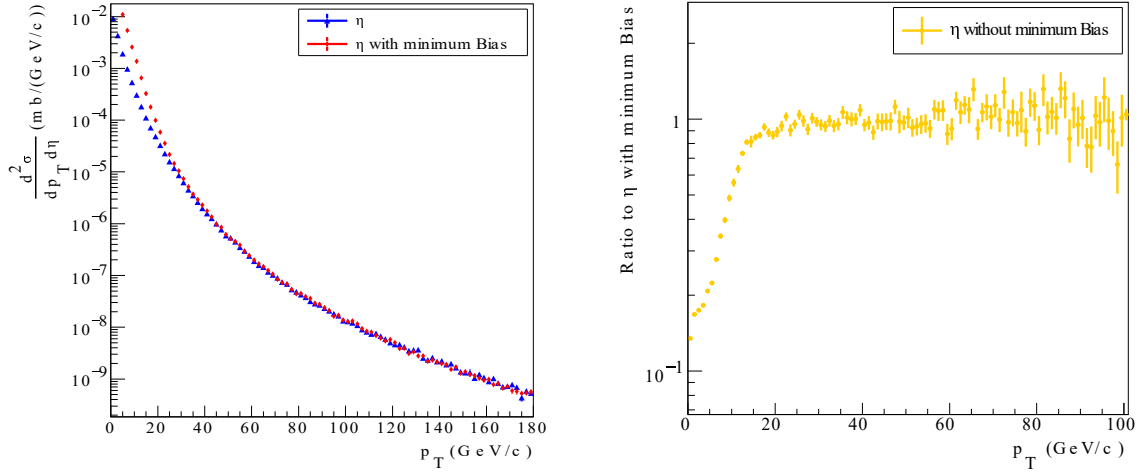
4.1.1 Statistischer Fehler

Bei der Simulation mit PYTHIA 8 muss beachtet werden, dass bei Teilchenkollisionen Events mit geringem Impulsübertrag wesentlich öfter auftreten als solche mit hohem. Da mit dem Programm allerdings nur eine begrenzte Anzahl von Events simuliert werden kann, sind die statistischen Unsicherheiten bei höheren Impulsüberträgen immer wesentlich größer als bei geringen. Um hier entgegenzuwirken, kann man die Simulation in verschiedenen $\hat{p}_T$ -Intervalle einteilen. Mit $\hat{p}_T$ wird hierbei der transversale Impulsübertrag der kollidierenden Partonen bezeichnet. Die einzelnen Intervalle haben nun dieselbe Anzahl von Events, sodass der statistische Fehler verringert werden kann. Anschließend müssen diese separat entstandenen Histogramme addiert werden. Dies ist natürlich nicht sehr physikalisch, man würde ein Histogramm erhalten, welches an eine Sägezahnfunktion erinnert. Deswegen müssen die einzelnen Spektren des $\hat{p}_T$ -Intervalls noch mit dem Wirkungsquerschnitt multipliziert werden, der zur Simulation des jeweiligen Prozesses verwendet wurde. Hiermit kommt ein physikalisch richtiges Ergebnis zustande. Anschließend wird noch mit der gesamten Anzahl an Events normiert, damit man ein Histogramm erhält welches den Wirkungsquerschnitt gegen die invariante Masse bzw. Schwerpunktenergie abbildet.

4.1.2 Minimum Bias

Aufgrund der hohen Energie und des Fokus auf hochenergetische Stöße mit der die Simulation betrieben wird, treten vorrangig *harte* Kollisionen auf, also solche mit hohem p_T . Dies führt dazu, dass die bei echten Teilchenkollisionen auftretenden *weichen* Kollisionen nicht genügend berücksichtigt werden. Um diese der Simulation beizufügen und ein realistischeres Ergebnis zu erzielen, muss ein *minimum Bias* aktiviert werden. Dies ist für die Selektion der Events das geringst mögliche Auswahlkriterium. Somit können weiche Prozesse besser einbezogen werden.

In Abbildung 7 ist der Effekt für das η Teilchen beispielhaft dargestellt.



(a) Zwei Vergleichskurven mit und ohne Minimum Bias.

(b) Auswirkung des minimum Bias.

Abbildung 7: Mit eingeschalteter minimum Bias Einstellung erkennt man, dass bis zu einem Impuls von 20 GeV die minBias-Events etwas häufiger vorkommen. Dort sind die weichen QCD Events vorhanden.

4.1.3 Parametereinstellungen

Für die Simulation wurden mehrere Parameter eingestellt. Zum einen ist die Schwerpunktsenergie auf $\sqrt{s} = 8 \text{ TeV}$ eingestellt worden und es wurden jeweils 10 Millionen Events berechnet. Die minimum Bias Einstellung wurde ebenfalls für alle Simulationen eingeschaltet, außer für die Untersuchung der harten QCD Prozesse. Beim ALICE Experiment ist bei Proton-Proton-Kollisionen der Jetradius R auf 0.4 eingestellt, während er bei Blei-Blei-Stößen 0.2 ist. Da hier ausschließlich Proton-Proton-Kollisionen beachtet werden, beläuft sich R auf 0.4. Die Pseudorapidität ist limitiert auf $|\eta| < 0,5$, während $|\eta_{jet}| < 0,5$. Für die Jets ist eine Mindestimpulsgrenze von 10 GeV eingestellt worden. Dies ist allerdings willkürlich geschehen, man könnte diese auch höher oder niedriger ansetzen.

4.2 Mesonen mit und ohne Strangeness

Für die folgenden Untersuchungen wurde das Verhältnis der produzierten Teilchen zu Pionen und zu Kaonen ermittelt. Da diese die beiden leichtesten Mesonen sind und das Kaon ein Strange-Quark besitzt, eignen sich diese besonders als Referenzmaß. Zu Beginn wurde die Simulation ohne Jet durchgeführt. Die dazu erstellten p_T Summary Plots sind in Abbildung 8 und 9 dargestellt. Die positiv und negativ geladenen Pionen und Kaonen wurden gemittelt, um sie als geladene Teilchen den neutralen Pionen und Kaonen gegenüberzustellen.

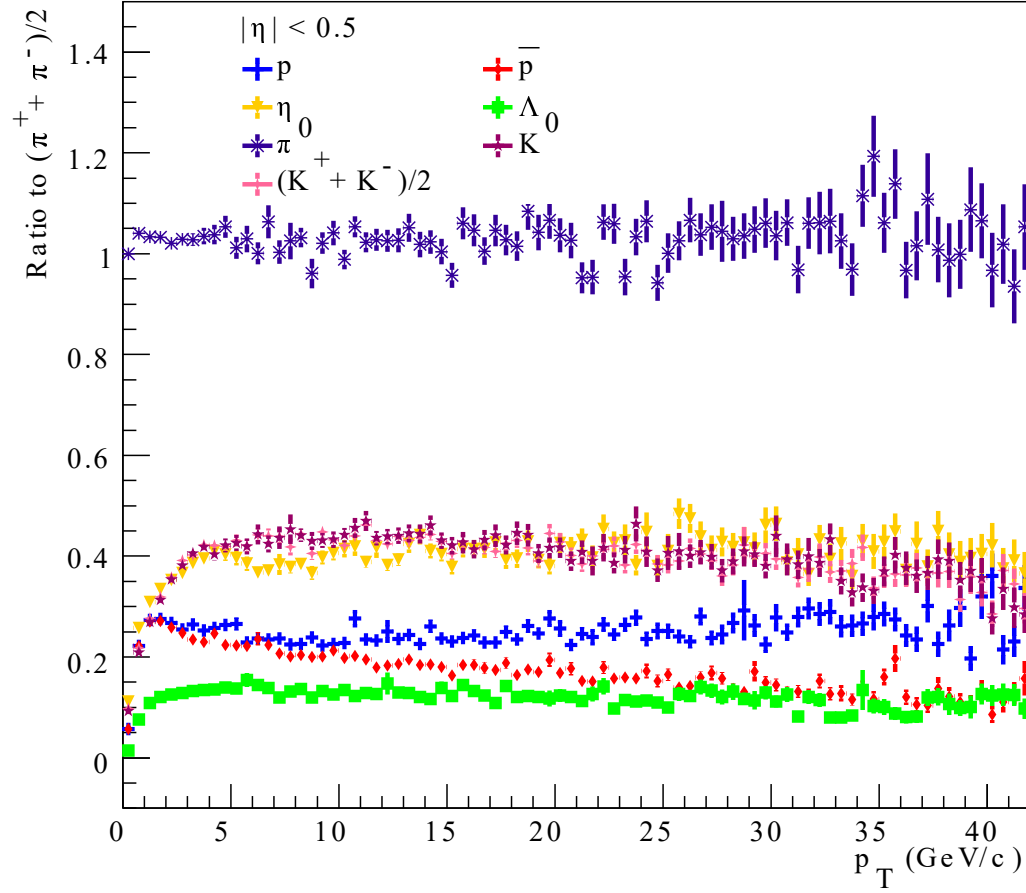


Abbildung 8: Verhältnis der produzierten Teilchen zu $(\pi^+ + \pi^-)/2$. Mit diesen Einstellungen wurden sowohl geladene als auch ungeladene Teilchen untersucht. Außerdem wurde diese Simulation ohne Jet durchgeführt.

An diesem Verhältnis der Teilchen in Abbildung 8 können einige Fakten herausgelesen werden. Zum einen ist das Verhältnis der neutralen Pionen zum $(\pi^+ + \pi^-)/2$ nahezu konstant 1. Dies ist nicht verwunderlich, da die Masse dieser beiden Teilchen mit 134,9 MeV zu 139,5 MeV sehr ähnlich ist. Bei den Protonen steigt das Verhältnis mit höheren Impulsen. Dabei divergiert dieses Verhältnis und das der Antiprotonen auseinander. Erklären lässt sich das mit den Valenzquarks. Bei niedrigen transversalen Impulsen reagieren vorrangig Gluonen und Seequarks, sodass ungefähr gleichmäßig Protonen und Antiprotonen erzeugt werden. Bei höheren Impulsen dominieren Reaktionen mit Valenzquarks. Da diese in diesem Experiment aus Up- und Down-Quarks bestehen, ist die Produktion von Protonen erleichtert.

Des Weiteren ist das Verhältnis zu den geladenen Kaonen abgebildet.

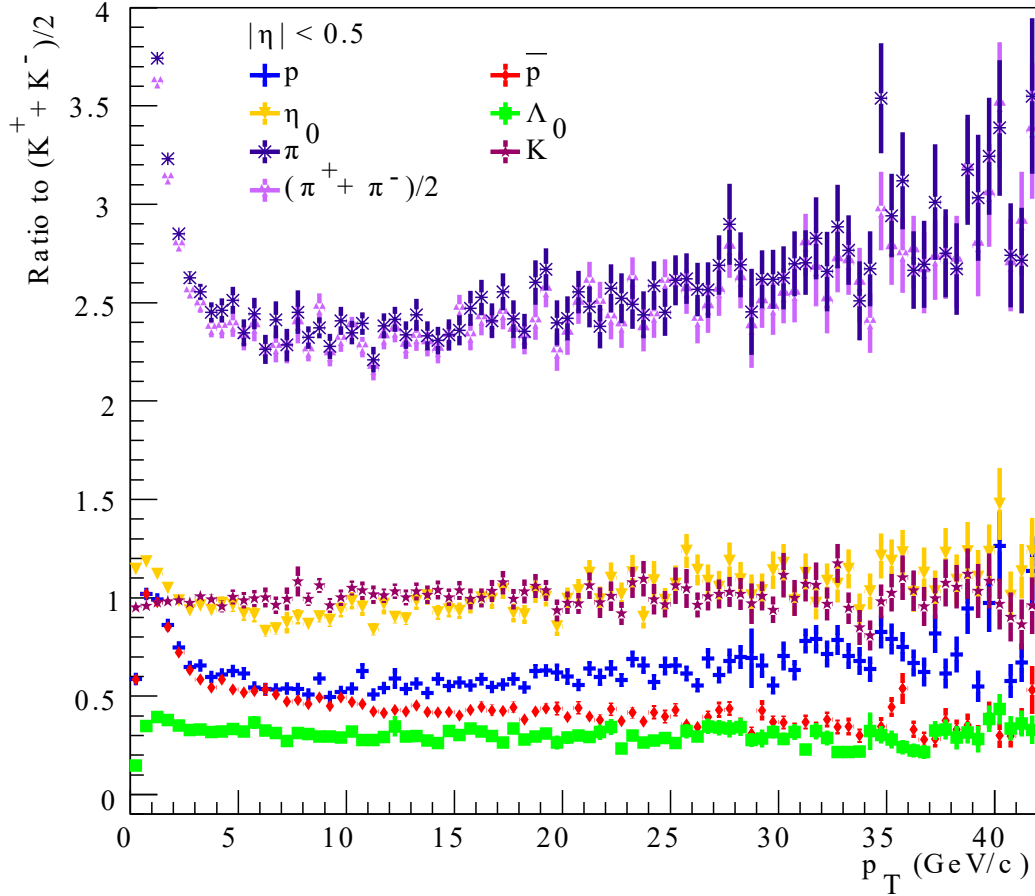


Abbildung 9: Verhältnis der produzierten Teilchen zu $(K^+ + K^-)/2$ ohne Jet.

In dieser Abbildung 9 kann gut erkannt werden, dass das Verhältnis sowohl der geladenen, als auch der neutralen Pionen höher ist als zuvor. Bei sehr geringen Impulsen ist es am höchsten und fällt anschließend ab. Von dort aus steigt es wieder leicht, allerdings nimmt die Schwankung ebenfalls stark zu. Das Verhältnis zum K^0 ist wie zu erwarten bei 1,0. An dem η - und Λ -Teilchen, sowie an dem Proton und Antiproton kann erkannt werden, dass sie bis zu einem Impuls von ungefähr 100 MeV leicht ansteigen, um anschließend zu fallen. Dabei haben sie alle ein unterschiedliches Anfangsverhältnis. Auch hier kann erkannt werden, dass sich Protonen und Antiprotonen mit steigenden Impulsen auseinander bewegen und das Verhältnis von Protonen höher ausfällt als der Antiprotonen.

4.2.1 Unterschiedliche Referenzteilchen

Die einzelnen Referenzteilchen werden auch untersucht, siehe Abbildung 10. Es wird dabei auf mögliche Korrelationen geachtet, die die Teilchen aufgrund ihrer Zusammensetzung besitzen könnten.

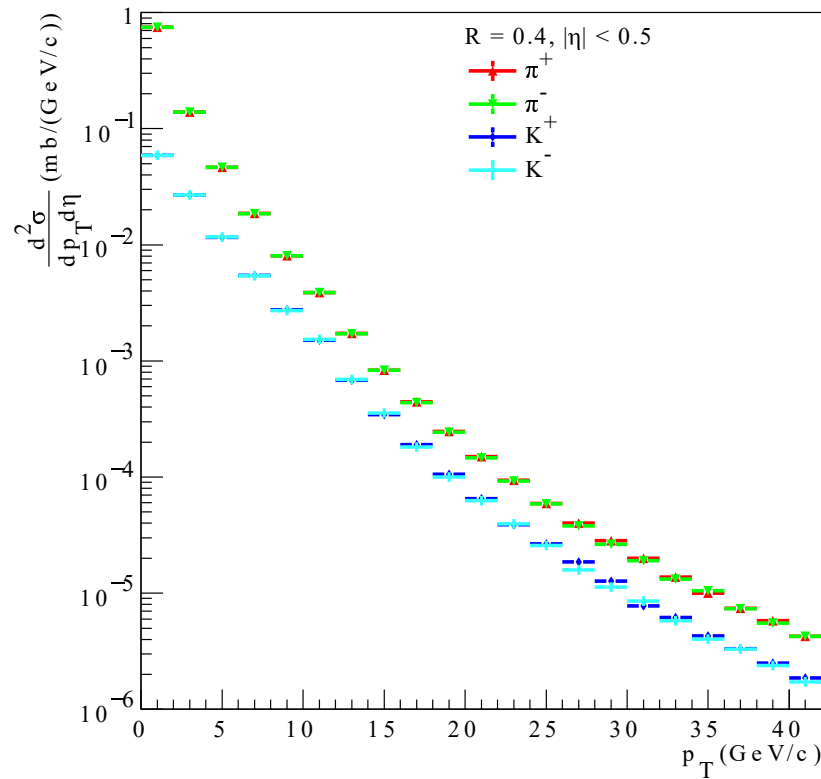


Abbildung 10: Impulsspektrum der einzelnen Teilchen, die als Referenzmaß genommen wurden.

Anhand dieser Abbildung kann erkannt werden, dass die leichteren Pionen erwartungsgemäß öfter auftreten als die schwereren Kaonen. Auch ist zu bemerken, dass die π^+ und die K^+ leicht öfter vorkommen als die π^- und die K^- . Dies könnte auf den Aufbau der Teilchen zurückzuführen sein. Sowohl π^+ als auch K^+ bestehen aus einem Up-Quark, welches das leichteste Quark ist und somit am häufigsten produziert wird. Auch ist zu bemerken, dass der Effekt der erhöhten Teilchenproduktion erst ab einem gewissen Impuls auftritt. Ab diesem Impuls könnten die Valenzquarksreaktionen dominieren und da zwei Protonen kollidieren sind mehr Up- als Down-Quarks vorhanden.

Um diesen Effekt genauer zu untersuchen, wurde noch das Verhältnis von π^+ zu π^- und von K^+ zu K^- betrachtet.

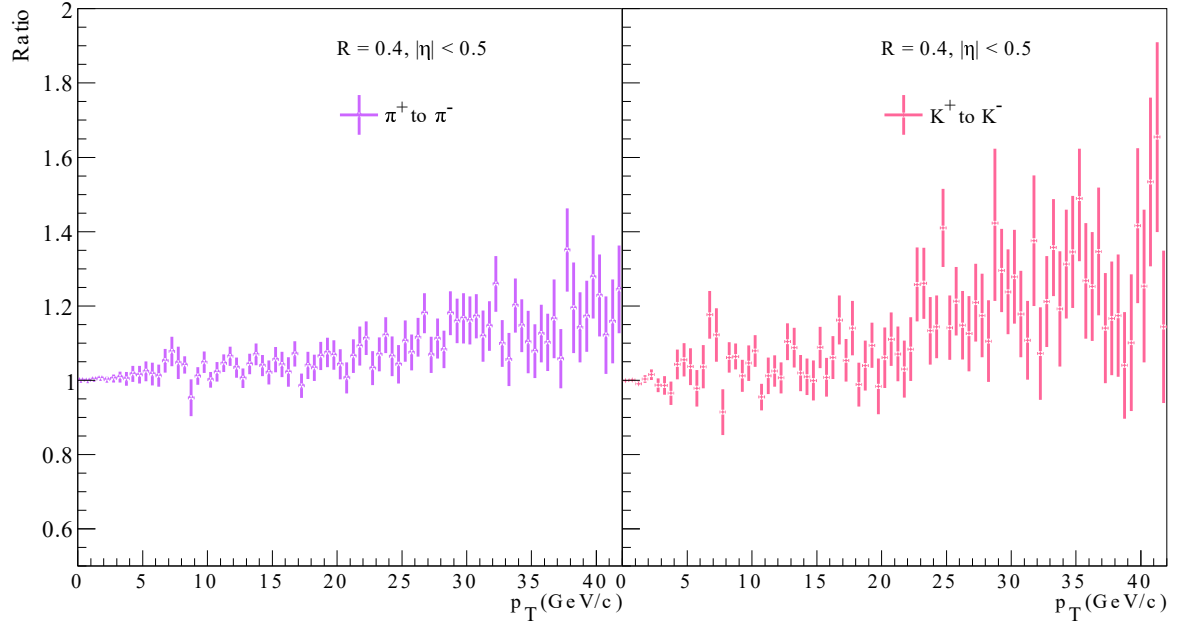


Abbildung 11: Verhältnis der produzierten Pionen und Kaonen.

Aus diese Abbildung 11 kann gut erkannt werden, dass die π^+ und K^+ etwas öfter erzeugt werden, als die π^- und K^- .

4.3 Transversale Masse

Es wurde zusätzlich noch ein Teilchenspektrum erstellt, welches das Verhältnis der Teilchen gegenüber der transversale Masse $m_T = \sqrt{m_0^2 + p_T^2}$ darstellt. Hiermit kann man den Einfluss der Ruhemasse der Teilchen noch mit einbeziehen.

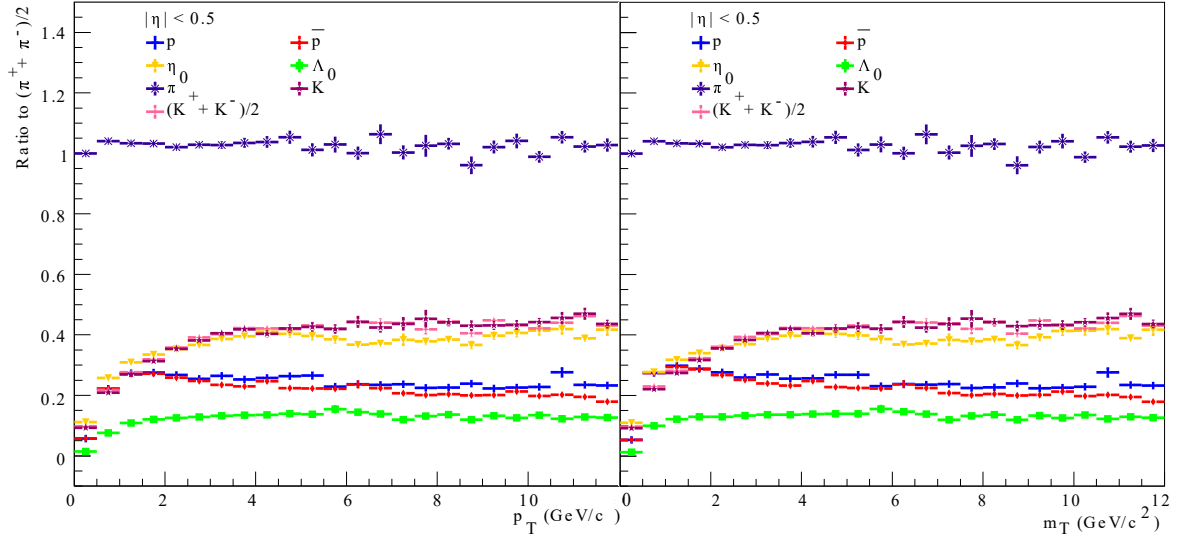


Abbildung 12: Verhältnis der produzierten Teilchen zu $(\pi^+ + \pi^-)/2$ ohne Jet. Hierbei ist rechts der transversale Impuls p_T mit der transversalen Masse m_T ersetzt worden.

Mit Abbildung 12 wird ersichtlich, dass sich bis 5 GeV das Verhältnis der Protonen, Antiprotonen, Lambdas und Kaonen leicht erhöht. Die leichteren Pionen bleiben unverändert. Bei steigenden Impulsen kann keine Veränderung ausgemacht werden, was verdeutlicht, dass es ab einer gewissen Energie keinen Unterschied für die relevante Produktionswahrscheinlichkeit mehr macht. Der transversale Impuls p_T ist so dominant, dass die unterschiedlichen Ruhemassen m_0 der einzelnen Teilchen vernachlässigt werden kann.

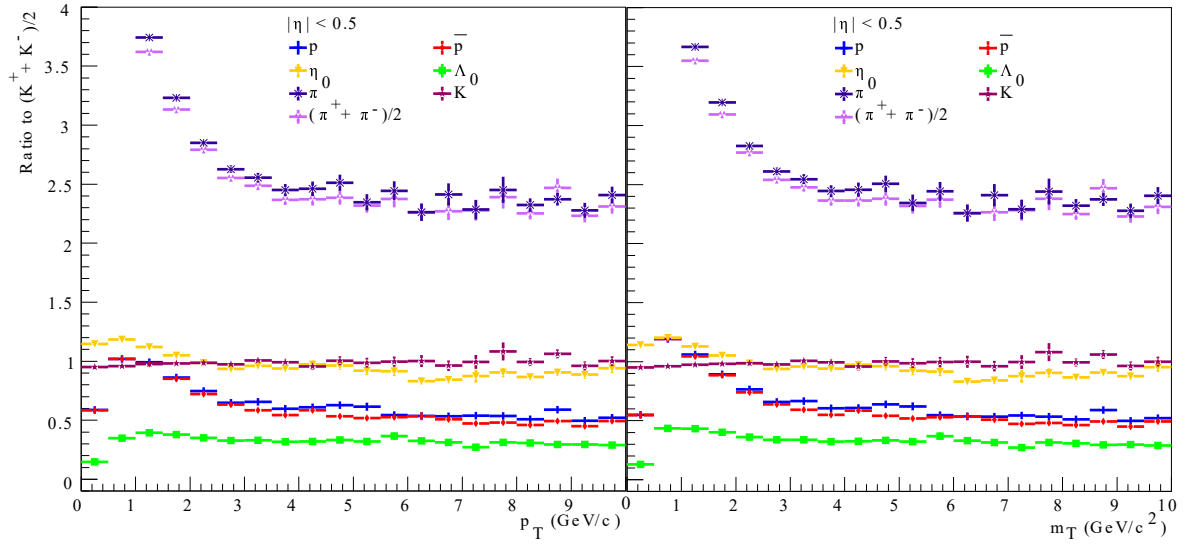


Abbildung 13: Verhältnis der produzierten Teilchen zu $(\pi^+ + \pi^-)/2$ ohne Jet. Hierbei ist der transversale Impuls p_T mit der transversalen Masse m_T ersetzt worden.

An dem Verhältnis zu den Kaonen kann dieselbe Auswirkung erkannt werden. Auch hier wird ersichtlich, dass die unterschiedlichen Massen der Teilchen nur eine sehr geringe Auswirkung haben.

4.4 Einfluss nach Jet

Des weiteren wird untersucht, wie sich die Teilchenverhältnisse ändern, wenn nur Events berücksichtigt werden mit mindestens einem Jet mit $p_T > 10 \text{ GeV}$. Dies ist in Abbildung 14 zu sehen.

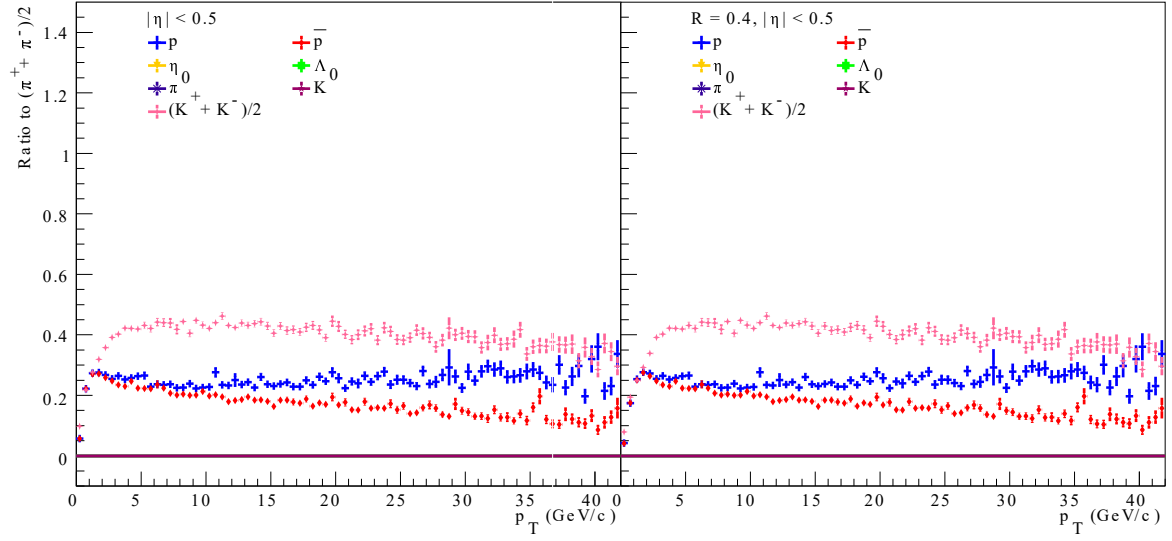


Abbildung 14: Verhältnis der produzierten Teilchen zu $(\pi^+ + \pi^-)/2$ mit und ohne Jet. Hier wurde nur nach geladenen Teilchen gesucht, zusätzlich wurde rechts nach einem Jet gefragt, welcher mindestens einen Impuls von 10 GeV besitzt.

Mit dem zusätzlich eingeschalteten Jets wie in Abbildung 14 kann man bei den geladenen Kaonen eine kleine Veränderung feststellen. In dem Bereich bis 3 GeV mit dem Jet ist eine leicht geringere Anzahl von ihnen zu beobachten. Bei den Protonen lässt sich das gleiche Phänomen ausmachen, hier sind auch weniger Teilchen aufzufinden. Der Grund hierfür liegt bei dem Jet. Es ist unwahrscheinlicher das ein bestimmtes Teilchen mit Jet gefunden werden kann, als ein Teilchen ohne Jet. Bei höheren Impulsen und an den restlichen Teilchen lassen sich keine Veränderungen feststellen.

Da die Auswirkungen des eingeschalteten Jets so klein sind, wurde ein Verhältnis der Spektren gebildet, Abbildung 15.

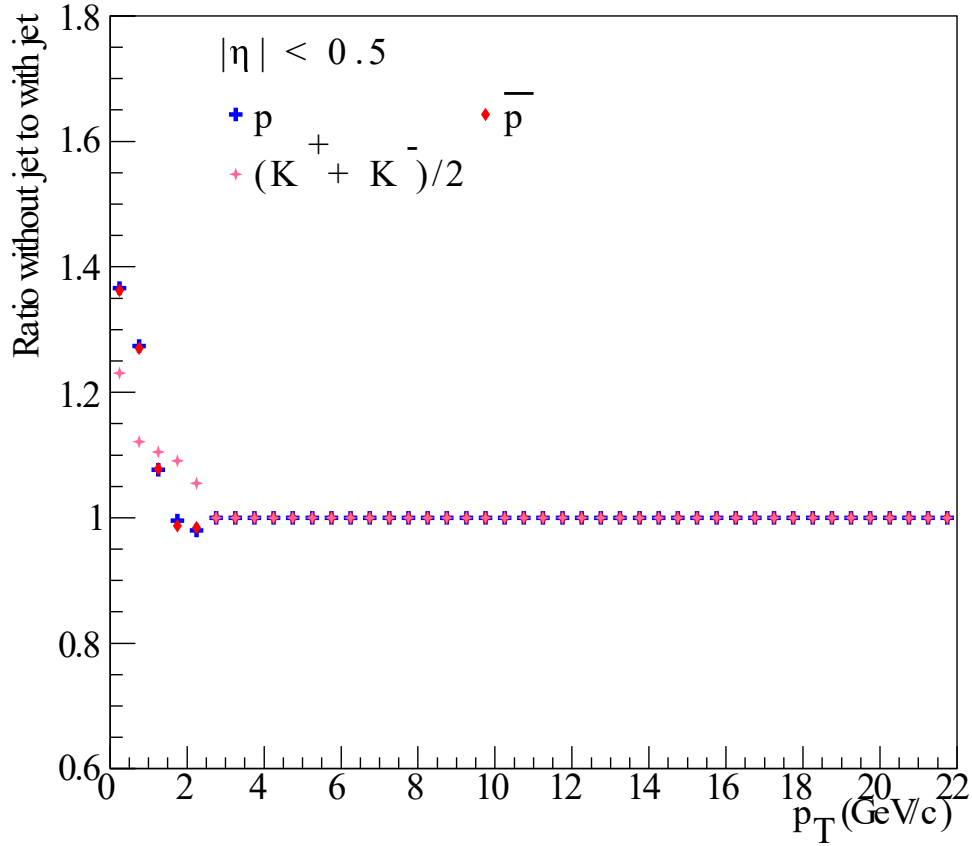


Abbildung 15: Änderungen durch einen hinzu geschalteten Jet. Die Unsicherheiten sind hier nicht mit angegeben. Da die Menge der Daten des Jets ein Subset der Menge der Daten ohne Jet ist, müsste ein binomialer Fehler angegeben werden. Dieser ist hier nicht vorhanden.

Hier kann erkannt werden, dass die Einflüsse nur in den ersten 3 GeV auftreten. Sowohl die Protonen, Antiprotonen als auch die geladenen Kaonen treten in der Simulation mit dem Jet weniger oft auf. Es scheint, als wäre es einfacher mit Pionen über die Schwelle für einen Jet zu kommen. Die vorhandene Energie kann in einen höheren Impuls umgesetzt werden und es muss nicht erst eine größere Masse wie bei den anderen Teilchen erzeugt werden.

4.5 Einfluss des Radius am Beispiel von geladenen Jets

Um den Einfluss eines Radius zu untersuchen wurde zwei Simulation mit unterschiedlichen Radien durchgeführt, dies ist in Abbildung 16 dargestellt.

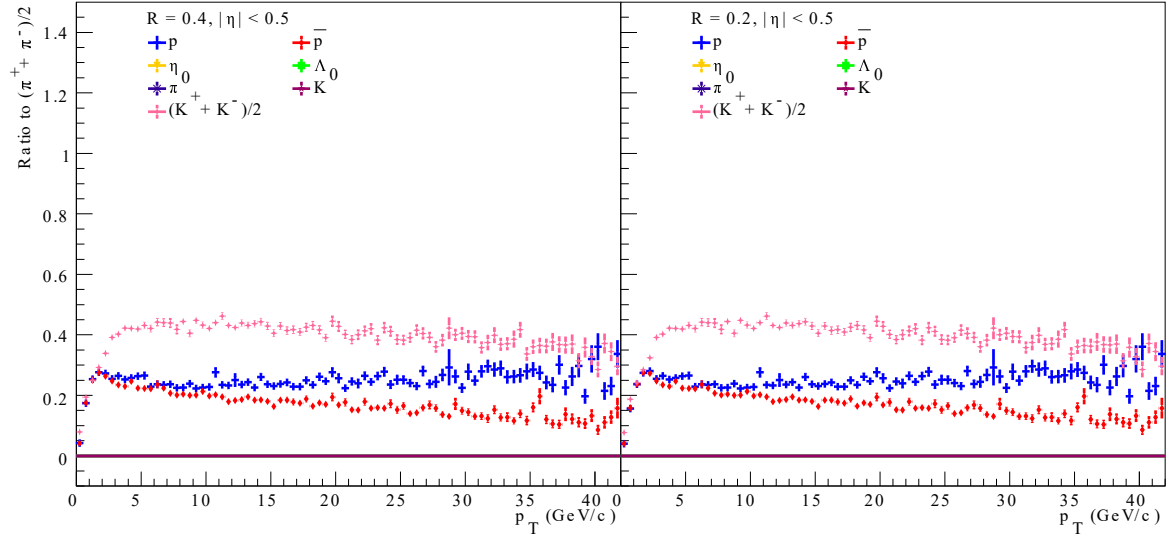


Abbildung 16: Verhältnis der produzierten Teilchen zu $(\pi^+ + \pi^-)/2$, mit unterschiedlichen Radien bei dem simulierten Jet. Links ist der Radius auf 0.4 eingestellt, während er rechts bei 0.2 liegt.

Es kann erkannt werden, dass bei kleinerem Radius im niedrigen Impulsbereich die Produktion der Teilchen unterdrückt ist. Der weitere Verlauf ist identisch mit dem Spektrum des größeren Radius.

Für das Kaon ist in Abbildung 17 das Ergebnis dargestellt.

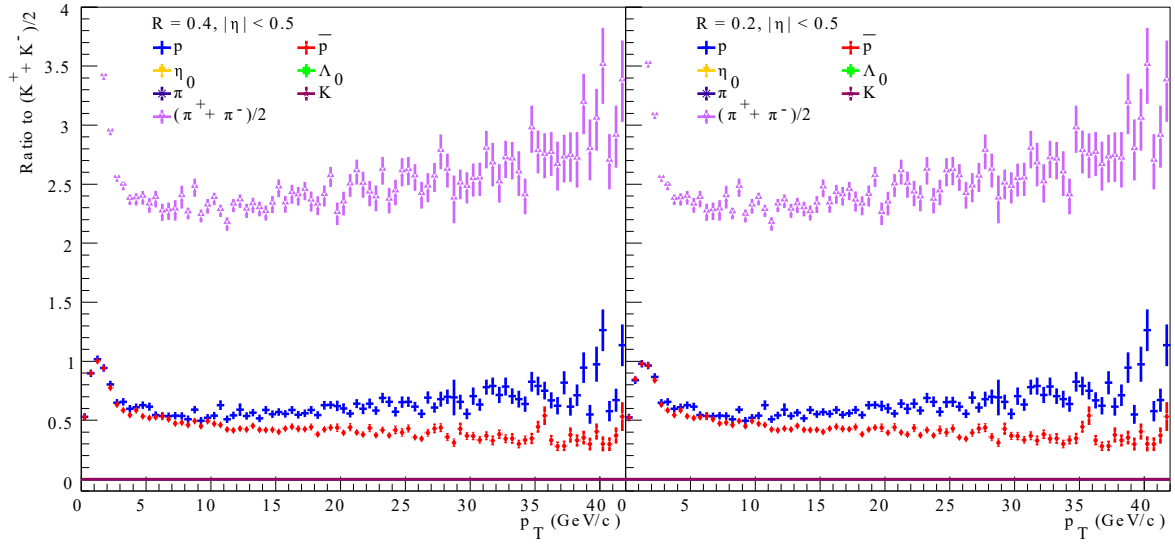


Abbildung 17: Verhältnis der produzierten Teilchen zu $(K^+ + K^-)/2$, mit unterschiedlichen Radien bei dem simulierten Jet. Links ist der Radius auf 0.4 eingestellt, während er rechts bei 0.2 liegt.

Auch hier ist die Teilchenproduktion bei niedrigen Impulsen bei kleinerem Radius in der rechten Abbildung gering erniedrigt.

Da es nur zu geringen Änderungen bei unterschiedlichem Radius kommt, ist ebenfalls ein Verhältnis gebildet worden, siehe Abbildung 18.

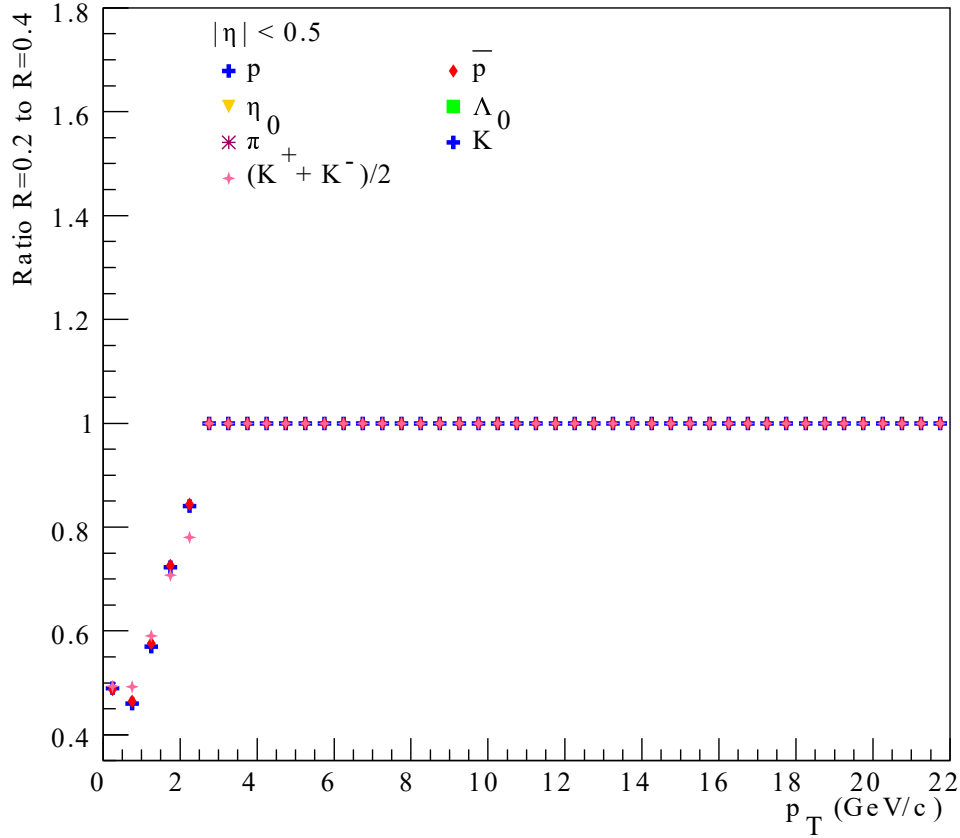


Abbildung 18: Änderungen der Teilchenproduktion durch Variation des Jetsradius.

Die relevanten Änderungen befinden sich hier auch in den ersten 3 GeV. Dies zeigt deutlich, dass die Produktion der Teilchen bei kleinerem Jetsradius R verringert ist.

Bei Jets befinden sich die Teilchen mit hohem p_T immer nahe an der Jetachse, sodass bei kleinem Jetsradius verhältnismäßig mehr Teilchen mit hohem p_T vorkommen. Dementsprechend sind weniger Teilchen mit niedrigen Transversalimpulsen vorhanden.

Mit diesen Voruntersuchungen kann nun die Standardeinstellung für *PYTHIA* am ALICE eingestellt werden. Diese besitzt für Proton-Proton-Kollisionen einen Radius von 0.4 und es wird nur nach geladenen Teilchen gesucht.

4.6 Einfluss der QCD Prozesse

Ein weiterer Teil dieser Bachelorarbeit beschäftigt sich mit der Untersuchung der Einflüsse von mehreren unterschiedlichen harten QCD Prozessen in *PYTHIA*. Diese Prozesse sind dabei immer ein möglicher Teilprozess von allen möglichen Reaktionen auf Partonenebene. Dementsprechend sind die entstehenden Spektren nur Teilspektren des Gesamtspektrums. Um dieses Gesamtspektrum zu erhalten, müsste man die einzelnen Teilspektren mit den entsprechenden Wirkungsquerschnitten multiplizieren und anschließend addieren. Auch in diesem

Abschnitt wurde wieder das Verhältnis der produzierten Teilchen zum geladenen Pion und Kaon untersucht.

4.6.1 Gluon-Gluon zu Gluon-Gluon

Zu Beginn wurde der $gg \rightarrow gg$ Prozess untersucht. Hierbei werden nur die Reaktionen simuliert, bei denen vor und nach dem Stoß ausschließlich Gluonen vorhanden sind. Diese können sich anschließend weiter zu Quark-Antiquark-Paaren aufspalten und Gluonen abstrahlen.

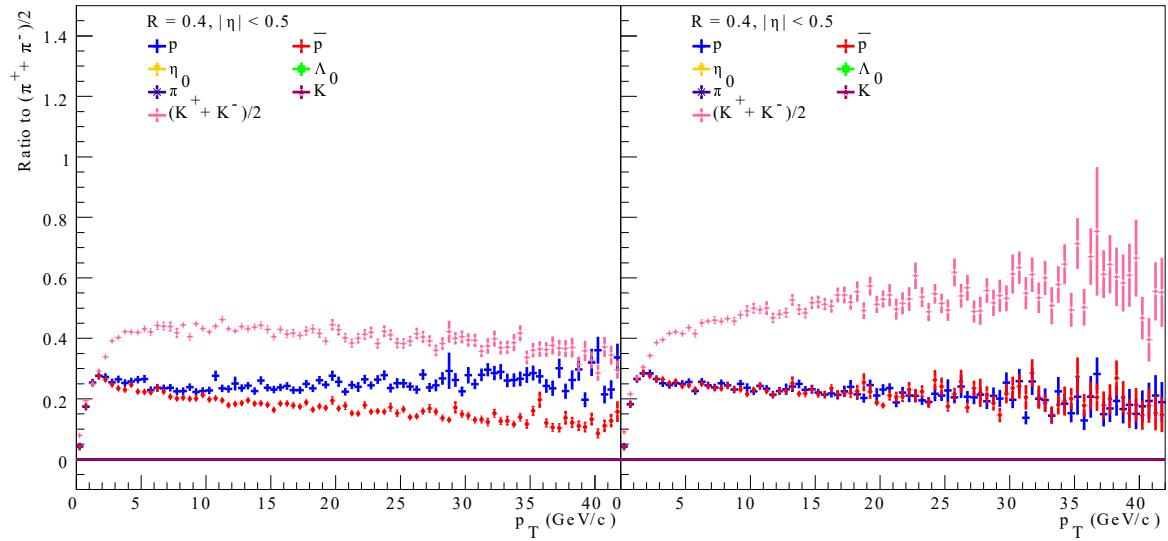


Abbildung 19: Verhältnis der produzierten Teilchen zu $(\pi^+ + \pi^-)/2$ mit allen Prozessen links und mit $gg \rightarrow gg$ Prozessen rechts.

Es ist in Abbildung 19 zu erkennen, dass bei reinen Gluonenreaktionen die Divergenz zwischen den Protonen und den Antiprotonen nicht vorhanden ist. Selbst bei höheren Impulsen sind die beiden Teilchen nahezu gleich oft vorhanden. Dafür tauchen ab ungefähr 20 GeV einige Schwankungen auf, die lediglich auf einige fehlende Eventstatistik zurückzuführen sind. Des Weiteren ist anzumerken, dass die Anzahl der produzierten geladenen Kaonen mit steigendem Impuls zunimmt, wobei sie bei kleinen Impulsen ganz leicht niedriger ist. Ein Grund für diese beiden Phänomene könnte die Eigenschaft der Gluonen sein, sich in ein Quark-Antiquark-Paar umwandeln zu können. Hiermit würde genau die passende Anzahl an Quarks und Antiquarks entstehen. Jeweils für die genau gleiche Rate an Protonen-Antiproton (welche jeweils nur aus Quarks bzw. Antiquarks bestehen) und für die Kaonen, welche aus einem Quark und einem Antiquark bestehen.

Wird das Verhältnis zu Kaonen genommen, siehe Abbildung 20, ist deutlich zu erkennen, dass die Pionenproduktion wesentlich geringer ausfällt, und die Produktion von Protonen und Antiprotonen bei niedrigen Impulsen leicht verringert ist. Allerdings ist hier zu Beachten, dass die Pionen bei kleinen Impulsen bis ungefähr 3 GeV öfter auftreten. Ein Grund könnte das Kaon sein, da dieses ein Strange-Quark besitzt. Strange-Quarks besitzen eine Masse von ca 100 MeV, die bei einer Teilchenproduktion erst einmal aufgebraucht werden muss. Bei initialen Gluon-Gluon-Reaktionen könnte es sein, dass es wahrscheinlicher ist, dass ein

Gluon mit höherem Impuls auftritt. Dies würde es wahrscheinlicher werden lassen, dass ein schweres Strange-Quark erzeugt werden kann, weshalb es eine größere Anzahl an Kaonen bei steigendem p_T gibt. Es ist auch hier wieder anzumerken, dass bei höheren Impulsen das Verhältnis von Protonen und Antiprotonen fast identisch ist.

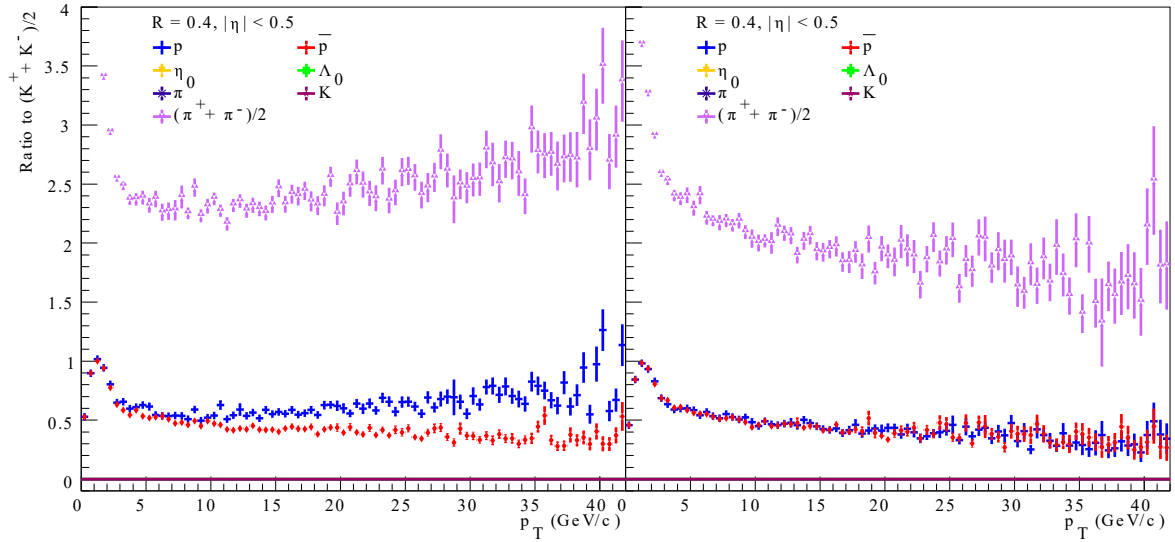


Abbildung 20: Verhältnis der produzierten Teilchen zu $(K^+ + K^-)/2$ mit allen Prozessen links und mit $gg \rightarrow gg$ Prozessen rechts.

4.6.2 Gluon-Gluon zu Quark-Antiquark

In den folgenden Prozessen wurden $gg \rightarrow q\bar{q}$ betrachtet, welche für Pionen in Abbildung 21 dargestellt sind. Die q stehen hierbei für leichte Quarks, also Up-, Down- oder Strangequarks.

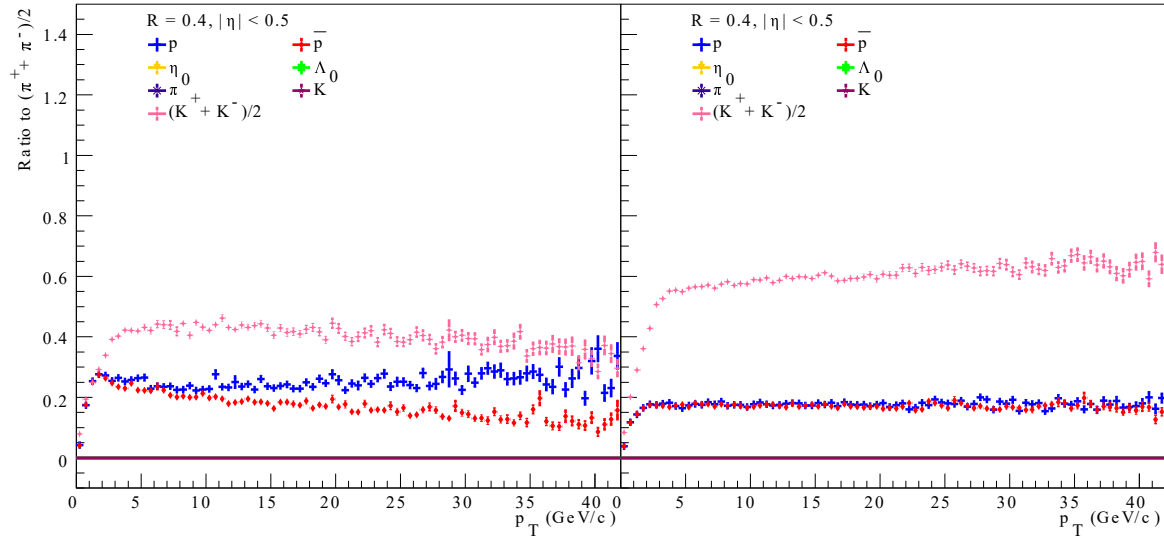


Abbildung 21: Verhältnis der produzierten Teilchen zu $(\pi^+ + \pi^-)/2$ mit allen Prozessen links und mit $gg \rightarrow q\bar{q}$ Prozessen rechts.

Anhand dieser Abbildung 22 kann unter anderem erkannt werden, dass die Protonen und Antiprotonen bei geringen transversalen Impulsen etwas seltener auftreten. Anschließend pendelt sich das Verhältnis von deren Produktion bei mittleren und höheren Energien ziemlich genau auf 0,2 ein. Für die Kaonen kann man erkennen, dass sie vermehrt auftreten und sich auf ein höheres Niveau einpendeln. Die Schwankungen sind bei allen Teilchen bemerkenswert klein. Der Grund hierfür liegt an der Produktion der $q\bar{q}$ -Paare. Falls mehrere dieser $q\bar{q}$ -Paare entstehen, passt dies gut für die Produktion von Mesonen wie z. B. das Kaon, da diese nur aus solchen bestehen. Die Kombination passt ebenfalls gut für Proton und Antiproton, da sie jeweils nur aus Quarks bzw. Antiquarks bestehen. So können zum Beispiel zwei Gluonen ein Up-Antiup-Paar bilden und ein Gluon ein Down-Antidown-Paar, sodass man genau die passende Quarkkombination hat, um ein Proton und ein Antiproton zu erzeugen.

Für das Verhältnis zu den Kaonen kann ein ganz ähnliches Muster erkannt werden, wie in Abbildung 22 dargestellt ist.

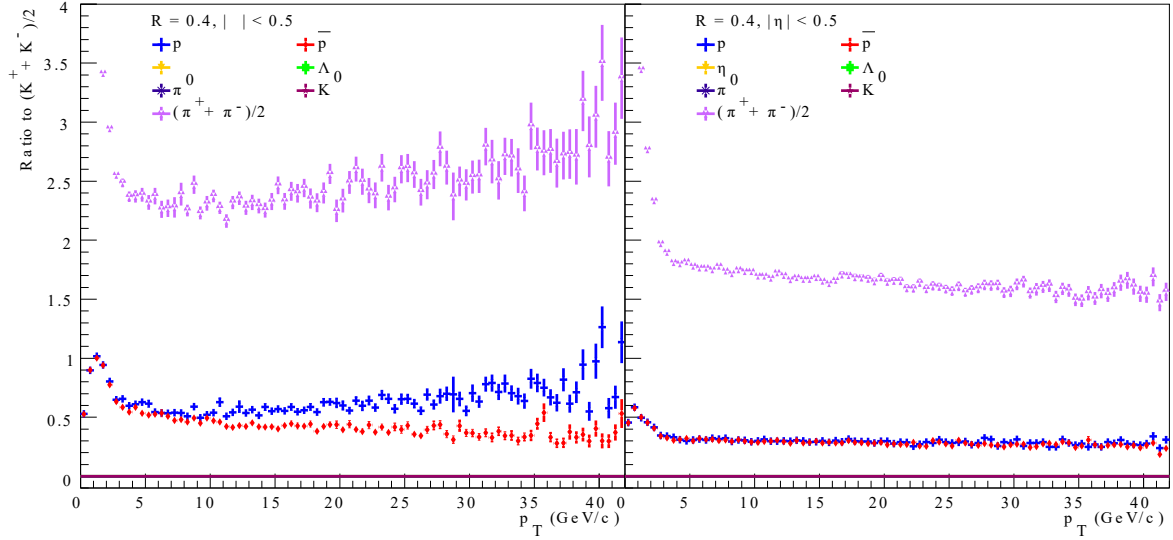


Abbildung 22: Verhältnis der produzierten Teilchen zu $(K^+ + K^-)/2$ mit allen Prozessen links und mit $gg \rightarrow q\bar{q}$ Prozessen rechts.

Die Produktion von Protonen und Antiprotonen ist bei niedrigen Impulsen geringer, aber mit kleineren Schwankungen. Die geladenen Pionen sind anfangs zahlreich vorhanden, fallen anschließend aber kontinuierlich. Die geringen Schwankungen deuten darauf hin, dass bei initialen Gluon-Gluon-Reaktionen mehr Teilchen entstehen als bei den anderen Prozessen. Deswegen kann man mit Blick auf den vorherigen Prozess erkennen, dass Kaonen in Reaktionen mit initialen Gluon-Gluon-Reaktionen bevorzugt erzeugt werden.

4.6.3 Quark-Gluon zu Quark-Gluon

Im Folgendem werden die gemischten Prozesse der $qg \rightarrow qg$ bzw. $\bar{q}g \rightarrow \bar{q}g$ Prozess behandelt.

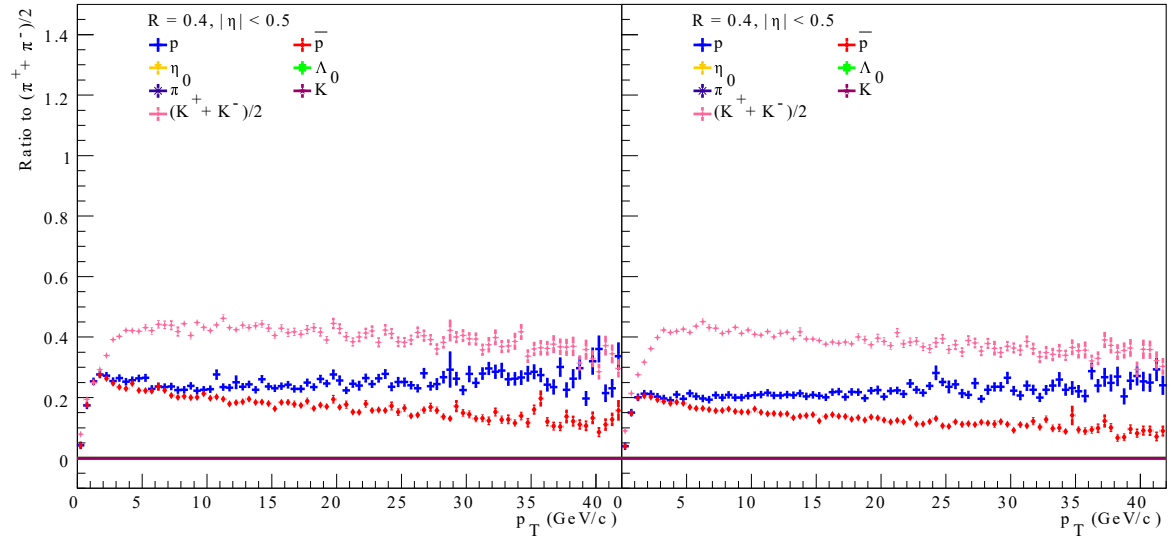


Abbildung 23: Verhältnis der produzierten Teilchen zu $(\pi^+ + \pi^-)/2$ mit allen Prozessen links und mit $qg \rightarrow qg$ Prozessen rechts.

In Abbildung 23 kann man erkennen, dass die Schwankungen bei den Protonen und Anti-protonen bis ungefähr 20 GeV geringer sind als bei der gesamten Simulation. Auch ist hier das Verhältnis bei geringen Impulsen etwas kleiner. Es ist zusätzlich zu beobachten, dass sich die Protonen und nicht mehr wie in der vorherigen Abbildung 19 überschneiden, sondern auseinander divergieren. An den Kaonen kann man hingegen sehen, dass das Verhältnis bei geringen Impulsen etwas kleiner ist. Insgesamt ändert sich wenig zum Gesamtspektrum.

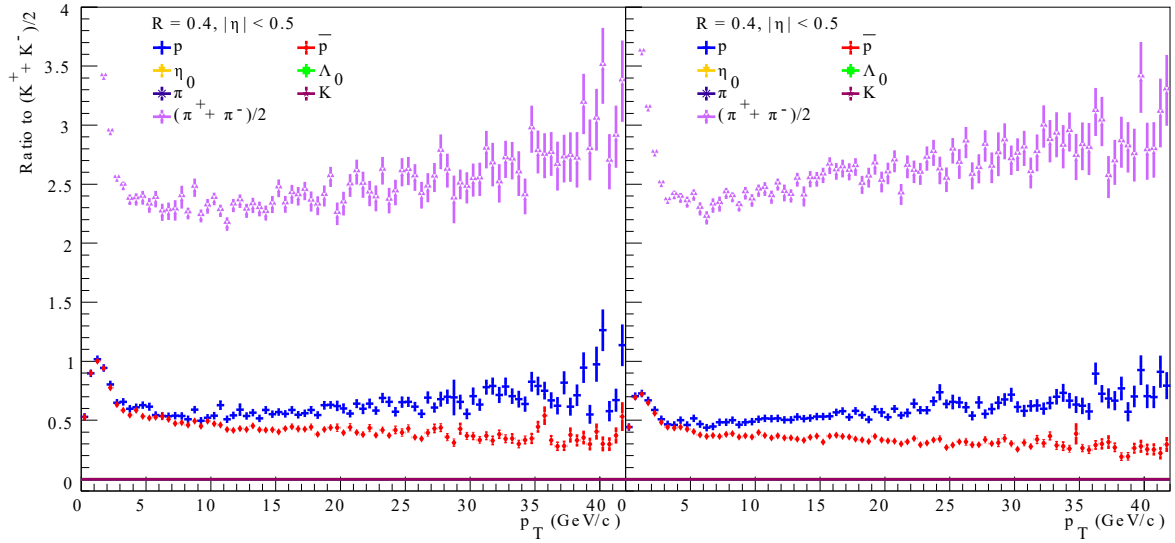


Abbildung 24: Verhältnis der produzierten Teilchen zu $(K^+ + K^-)/2$ mit allen Prozessen links und mit $qg \rightarrow qg$ Prozessen rechts.

Stellt man die Daten den Kaonen gegenüber, kann ein ähnliches Verhalten beobachtet werden. Die Protonen- und Antiprotonenverhältnisse sind bei geringen Impulsen etwas kleiner, auch sind die Schwankungen etwas kleiner.

4.6.4 Quark-Quark' zu Quark-Quark'

Zuletzt wurde der Prozess untersucht, an dem die Anfangsflavour den Endflavour entsprechen, also $qq' \rightarrow qq'$, $q\bar{q}' \rightarrow q\bar{q}'$ oder $\bar{q}\bar{q}' \rightarrow \bar{q}\bar{q}'$. Hierbei können q und q' auch identisch sein.

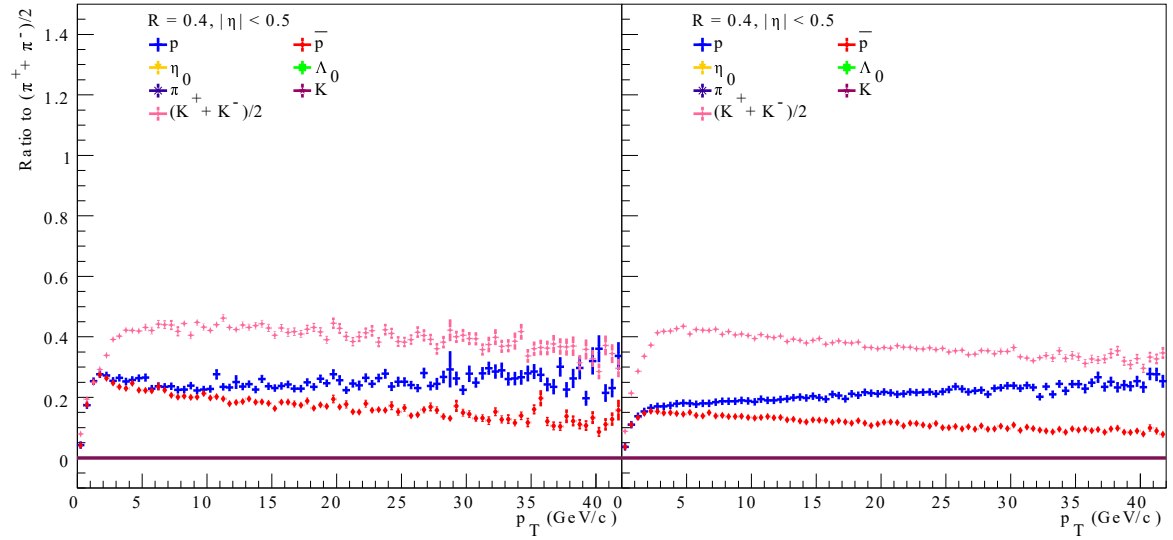


Abbildung 25: Verhältnis der produzierten Teilchen zu $(\pi^+ + \pi^-)/2$ mit allen Prozessen links und mit $qq' \rightarrow qq'$ Prozessen rechts.

Es ist für die Pionen in Abbildung 25 zu erkennen, dass hier bei geringen Impulsen das Verhältnis der Protonen und Antiprotonen geringer ausfällt. Für den weiteren Verlauf ergeben sich allerdings keine großen Änderungen, da sie sich auf ungefähr das gleiche Niveau einpendeln und sie sich mit steigenden Impulsen auseinander divergieren. Bei den Kaonen tritt ebenfalls eine Änderung bei niedrigen Impulsen auf. Dort treten sie etwas öfter auf. Der weitere Verlauf ist allerdings, mit Ausnahme von geringeren Schwankungen, ohne relevante Änderung.

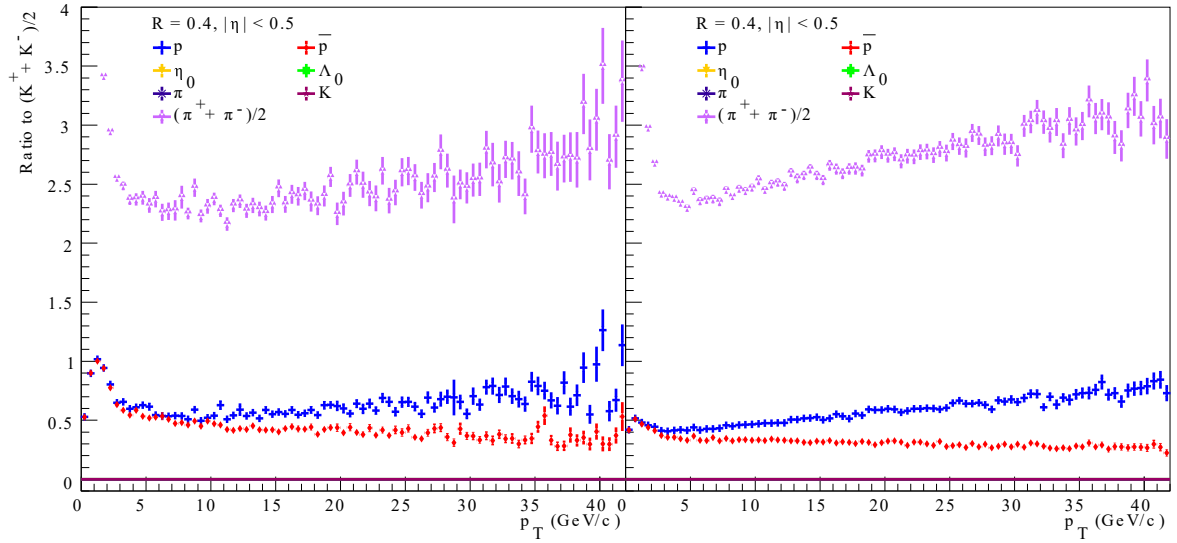


Abbildung 26: Verhältnis der produzierten Teilchen zu $(K^+ + K^-)/2$ mit allen Prozessen links und mit $qq' \rightarrow qq'$ Prozessen rechts.

In dem Verhältnis zu den Kaonen verhalten sich die Protonen und Antiprotonen ähnlich. Sie sind bei geringen Impulsen nur noch halb so oft vorhanden und steigen dann ohne größere Schwankungen. Die Pionen treten bei kleinen Impulsen ein wenig öfter auf und wachsen dann leicht stärker als bei der Simulation mit den gesamten Prozessen. Die Gründe hierfür liegen bei den fehlenden Reaktionen mit den Gluonen. Diese sind bei niedrigen Impulsen am dominantesten, sodass sie in diesem Fall nicht zur Geltung kommen können. An den höheren Impulsen passen die beiden Spektren allerdings wieder gut überein, da hier die Reaktionen mit den Valenzquarks dominieren.

4.6.5 Teilprozesse

Um zu sehen, wie groß die Einflüsse der einzelnen Prozesse ist, wurde die Abbildung 27 erstellt. Hier sind die Spektren der einzelnen Prozesse jeweils durch das Gesamtspektrum dividiert worden, damit ein Verhältnis gewonnen werden konnte.

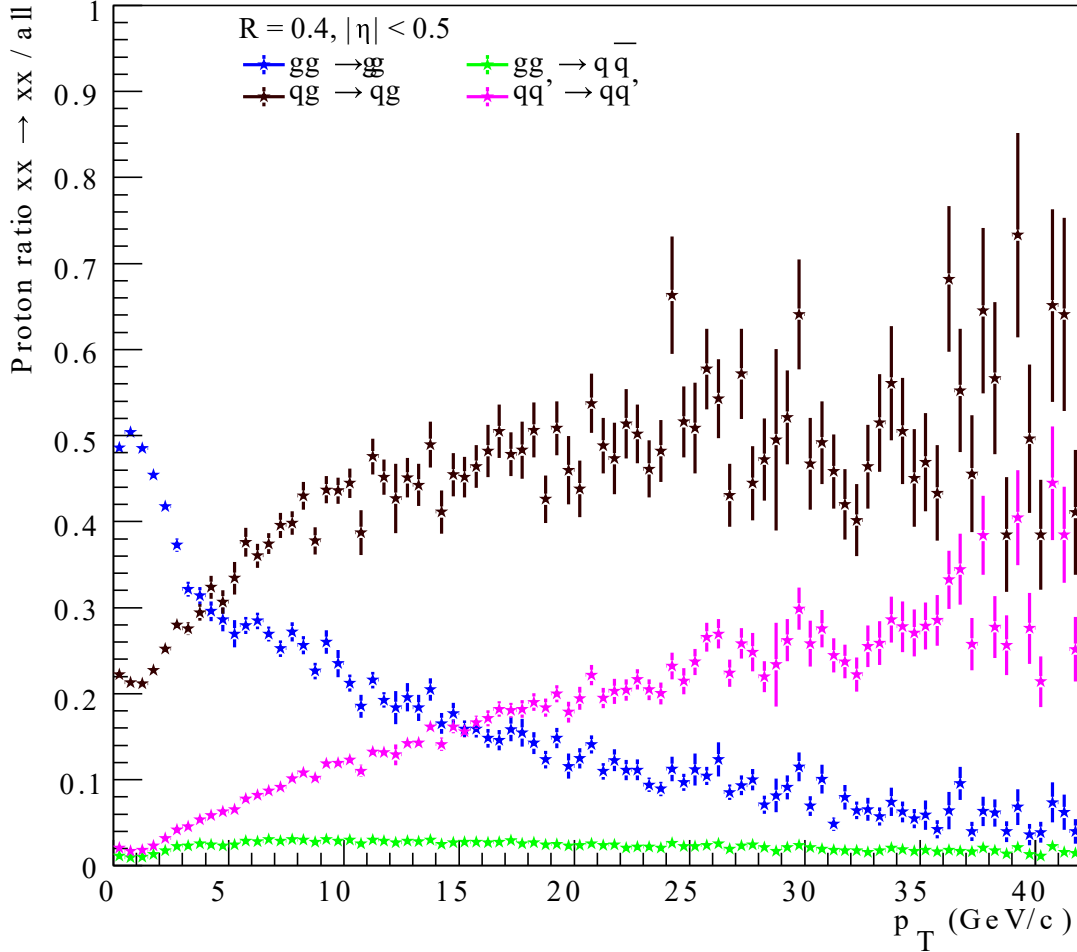


Abbildung 27: Verhältnis der Protonenspektren der einzelnen Prozesse zum Gesamtspektrum.

Es kann gut erkannt werden, welche Prozesse bei den entsprechenden Impulsen dominieren. Bei niedrigen Transversalimpulsen haben die $gg \rightarrow gg$ den größten Einfluss. Dieser verkleinert sich mit steigenden Impulsen und die $qg \rightarrow qg$ und $qq' \rightarrow qq'$ Prozesse steigern ihre Relevanz. Die $gg \rightarrow q\bar{q}$ Reaktionen sind durchgängig von geringer Bedeutung. Dies verdeutlicht den größeren Einfluss der Gluonen und Seequarks bei geringen Impulsen und die Bedeutung der Valenzquarks bei hohen transversalen Impulsen.

Dieser Effekt kann ebenfalls verdeutlicht werden, indem die einzelnen Spektren der Prozesse zusammen in Abbildung 28 dargestellt werden.

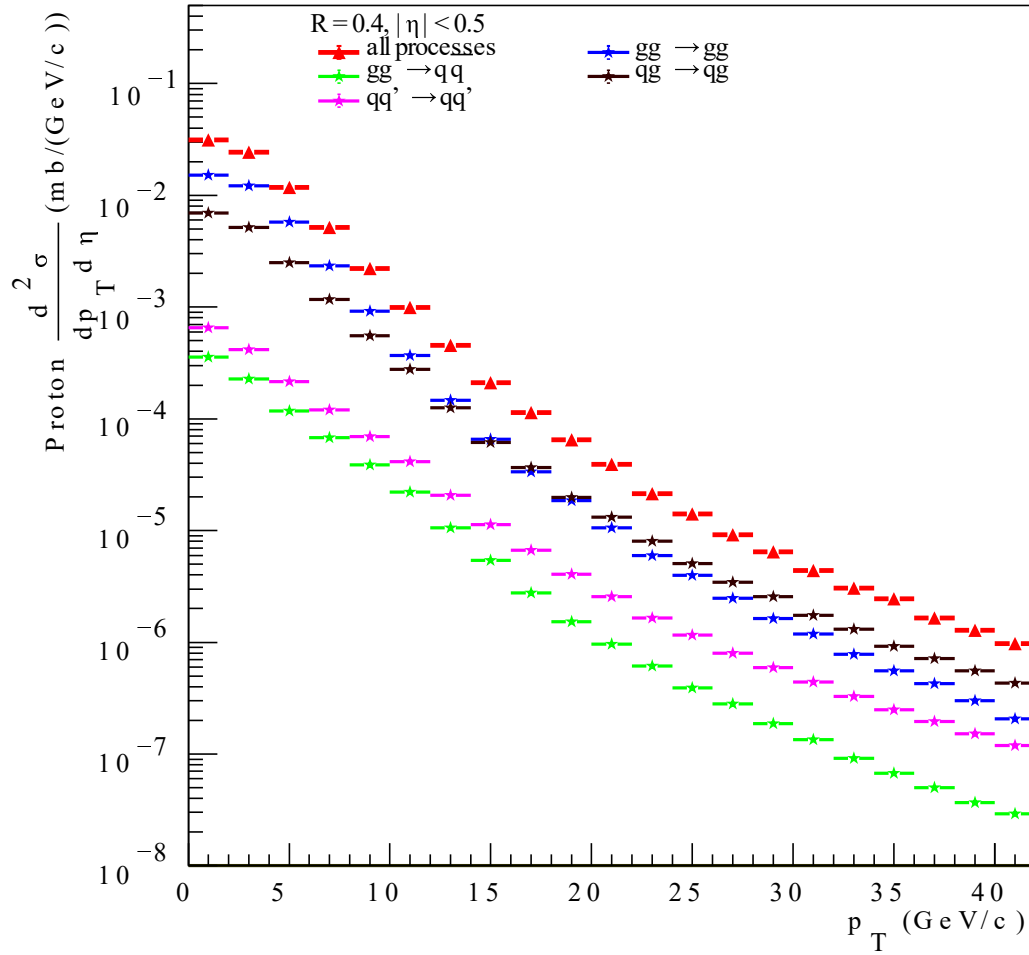


Abbildung 28: Spektren der einzelnen Prozesse von Protonen.

Die $gg \rightarrow gg$ haben bei geringen Impulsen den größten Einfluss, welcher bei steigendem Impuls fällt. Die $qg \rightarrow qg$ und $qq' \rightarrow qq'$ Prozesse werden wie zuvor bei größeren Impulsen von größerer Bedeutung.

5 Zusammenfassung

In dieser Bachelorarbeit wurden die Auswirkungen von mehreren Simulationseinstellungen in *PYTHIA* untersucht. Dabei ist eine Proton-Proton-Kollision mit $\sqrt{s} = 8 \text{ TeV}$ simuliert und mit unterschiedlichen Modifikationen versehen worden.

Zu Beginn wurde das jeweilige Teilchenspektrum im Verhältnis zum Pion und Kaon gesetzt. Dort konnte erkannt werden, dass bei geringen Energien die neutralen und geladenen Pionen wesentlich öfter produziert worden sind als die Kaonen.

Im Vergleich der Pionen und Kaonen untereinander, konnte erkannt werden, dass die K^+ und die π^+ aufgrund ihrer Zusammensetzung leicht öfter produziert wurden als ihre Antiteilchen. Auch wurde bei der Betrachtung der transversalen Massen ersichtlich, dass der Massenunterschied der Teilchen nur sehr geringe Auswirkungen auf die Spektren besitzt.

Bei einer Simulation mit zusätzlich simuliertem Jet, welcher mindestens einen Impuls von 10 GeV besitzt und einen Radius von $R = 0.4$, kommt es bei niedrigen transversalen Impulsen zu kleinen Veränderungen. Die Anzahl der produzierten Kaonen, Protonen und Antiprotonen wird verringert. Wenn nun der Radius auf $R = 0.2$ verkleinert wird, verringert sich Produktion der Teilchen noch weiter.

Als Nächstes wurden die unterschiedlichen QCD Prozesse untersucht. An den $gg \rightarrow gg$ Prozessen wurde ersichtlich, dass die Kaonenproduktion erhöht ist und das gleich viele Protonen wie Antiprotonen erstellt worden sind. Die Pionenproduktion bei steigenden Impulsen ist üüberdrückt. Ein ähnliches Ergebnis ist bei dem $gg \rightarrow q\bar{q}$ Prozess zustande gekommen. Nur waren hier die Schwankungen wesentlich geringer. Bei dem $qg \rightarrow qg$ Prozess war bei geringen Impulsen eine verringerte Anzahl von Protonen und Antiprotonen zu erkennen. Ansonsten gab es keine größeren Auffälligkeiten. Der letzte untersuchte Prozess, der $qq' \rightarrow qq'$, hat ein Ergebnis hervorgebracht, welches dem $qg \rightarrow qg$ sehr ähnlich ist. Auch hier wurden weniger Protonen und Antiprotonen erzeugt. Die Schwankungen sind hier allerdings geringer.

Falls nun alle Prozesse im Verhältnis zueinander gesetzt werden, ist erkennbar, dass bei niedrigen Transversalimpulsen die Gluonenreaktionen dominieren, während bei steigende Impulsen die Reaktionen mit den Valenzquarks relevanter werden.

Literatur

- [1] W. Demtröder. *Experimentalphysik*. 5. Auflage. Springer Spektrum, 2016
- [2] B Povh, K. Rith, C. Scholz, F. Zetsche. *Teilchen und Kerne*. 7. Auflage. Springer, 2006
- [3] Prof. Dr. Klein-Bösing, Christian: *Study of the Quark-Gluon Plasma with Hard and Electromagnetic Probes*. Westphälische Wilhelms-Universität Münster, Habilitation, 2013.
- [4] M. Bertelmann, B. Bartelmann, B. Feuerbacher, T. Krüger, D. Lüst, A. Rebhan, A. Wipf. *Theoretische Physik*. Springer-Verlag, 2014.
- [5] Haake, Rüdiger: *Measurement of charged jets in p-Pb collisions at $\sqrt{s_{NN}} = 5.02$ TeV with the ALICE detectors*, Westphälische Wilhelms-Universität Münster, Dissertation, 2015
- [6] C.Bierlich, N. Desai, I. Helenius, P. Ilten, L. Lönnblad, S. Mrenna, S. Prestel, C. Rasmussen, T. Sjöstrand, P. Skands, PYTHIA, <http://home.thep.lu.se/~torbjorn/Pythia.html> (letzter Zugriff 30.07.2019).
- [7] M. Cacciari, G.P. Salam and G. Soyez, Eur.Phys.J. C72 (2012) 1896 [arXiv:1111.6097] (letzter Zugriff 19.08.2019).
- [8] D. Piparo, G. Quast, M. Zeise, A Root Guide For Beginners - Root Data Analysis Framework, <https://root.cern.ch/root/html/doc/guides/primer/ROOTPrimerLetter.pdf> (letzter Zugriff 19.08.2019).
- [9] R. Bellwind, ALICE EMCAL Physics Performance Report, <https://arxiv.org/abs/1008.0413> (letzter Zugriff 25.07.2019).
- [10] Y. Kharlov, Performance of Calorimetry in ALICE <https://arxiv.org/abs/1809.08183> (letzter Zugriff 21.08.2019).
- [11] CERN, <http://cds.cern.ch/record/971033/files/brochure-2006-002-ger.pdf> (letzter Zugriff 19.08.2019).
- [12] CERN, <https://cds.cern.ch/record/2197559> (letzter Zugriff 19.08.2019).
- [13] CERN, <https://home.cern/sites/home.web.cern.ch/files/2018-07/CERN-Brochure-2017-002-Eng.pdf> (letzter Zugriff 19.08.2019).
- [14] ALICE, <http://alice.web.cern.ch/detectors/more-details-alice-photon-spectrometer> (letzter Zugriff 25.07.2019).
- [15] CERN, <http://www.lhc-facts.ch/index.php?page=alice> (letzter Zugriff 04.07.2019).
- [16] ALICE, <http://aliceinfo.cern.ch/Public/en/Chapter2/Chap2Experiment-en.html> (letzter Zugriff 07.07.2019).

Eigenständigkeitserklärung

Hiermit versichere ich, dass die vorliegende Arbeit über selbstständig von mir und ohne fremde Hilfe 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. Mir ist bekannt, dass es sich bei einem Plagiat um eine Täuschung handelt, die gemäß der Prüfungsordnung sanktioniert werden kann.

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.

Ich versichere, dass ich die vorliegende Arbeit oder Teile daraus nicht anderweitig als Prüfungsarbeit eingereicht habe.

(Datum, Unterschrift)