

Gymnasium Luisenstift Radebeul

Nachweis des Higgs-Bosons in $H \rightarrow \gamma\gamma$ Zerfällen

Jakob Walter, 10/6

Betreuerender Fachlehrer: Herr Pätzold

einzubringen im Fach Physik

27.02.2023

Inhalt

1	Einleitung	4
2	Grundlagen	5
2.1	Standardmodell der Teilchenphysik.....	5
2.2	Elektromagnetische Wechselwirkung.....	6
2.3	Erhaltungssätze	6
2.4	Vierervektoren.....	7
2.5	Invariante Masse	7
2.6	Kurvenanpassung (Fit)	8
3	Das Higgs	9
3.1	Higgs-Feld.....	9
3.2	Higgs-Boson.....	9
3.3	Higgs Produktion	10
3.4	Higgs Zerfälle.....	10
3.5	Statistischer Nachweis des Higgs-Bosons	10
4	Teilchenbeschleuniger und Detektoren	12
4.1	LHC (Large Hadron Collider).....	12
4.2	ATLAS (A Toroidal LHC Apparatus) Detektor	13
4.3	ATLAS Koordinatensystem.....	15
5	Nachweis des Higgs-Bosons in Python	16
5.1	Event Selektion in Python.....	16
5.2	Higgs Fit.....	17
5.3	Bedeutung der Invarianten Masse des Higgs bei 125 GeV.....	18
6	Fazit	19
7	Quellenverzeichnis	20
7.1	Literaturverzeichnis.....	20
7.2	Bildnachweis	22
8	Danksagung	23

9	Selbstständigkeitserklärung	24
---	-----------------------------------	----

1 Einleitung

Im Rahmen der vorliegenden Facharbeit setze ich mich mit der Suche nach dem Higgs-Boson in einem $H \rightarrow \gamma\gamma$ Zerfall auseinander. Das Higgs-Boson wurde in den 1960er-Jahren von Peter Higgs und seinen Kollegen postuliert. Der Nachweis des Higgs-Boson sollte aber noch mehrere Jahrzehnte dauern, da für die Erzeugung des Bosons Teilchenbeschleuniger mit sehr hohen Energien benötigt werden. Mit dem Hauptziel das Higgs nachzuweisen, wurde in der Schweizer Stadt Genf am Conseil Européen pour la Recherche Nucléaire CERN der größte Teilchenbeschleuniger der Welt gebaut, der Large Hadron Collider LHC. Nach drei Jahren Laufzeit gelang es dort an den Detektoren ATLAS und CMS genügend Daten zu sammeln, um die fünf Sigma Schwelle zu überschreiten. Am 4. Juli 2012 wurde am CERN schließlich ein Plot veröffentlicht, der die eindeutige Existenz des Higgs bei einer Masse von 125GeV nachwies. Peter Higgs und François Englert bekamen ein Jahr später den Nobelpreis für ihre Theorie.

In meiner Arbeit habe ich mithilfe von ATLAS Open Data einen Plot in Python erstellt, der dem 2012 veröffentlichtem Higgs-Plot entspricht. ATLAS Open Data bietet freien Zugang zu ausgewählten Daten, die das ATLAS Experiment aufgezeichnet hat.

Zur Auswertung dieser Daten setze ich mich in dieser Arbeit zuerst mit den Grundlagen der Kern- und Teilchenphysik auseinander. Des Weiteren liegt der Fokus dieser Arbeit auf dem Higgs-Boson und auf den Beschleunigern und Detektoren, die für den Nachweis des Higgs benötigt werden. Diese Themen führe ich am Ende dieser Arbeit zusammen. Indem ich mit Hilfe des Fachbereichs für Kern- und Teilchenphysik der TU Dresden den oben erwähnten Higgs-Plot erstellt habe. Als weitere Grundlagen für meine Facharbeit habe ich Materialien des Instituts für Kern- und Teilchenphysik der TU Dresden und des Netzwerks Teilchenwelt genutzt. Im Verlauf meiner Arbeit fokussiere ich mich auf zwei Thesen. Die erste These bezieht sich auf den Higgs-Zerfall: Es ist möglich, dass das Higgs-Boson in zwei Photonen ($H \rightarrow \gamma\gamma$) zerfällt. Mit meiner zweiten These möchte ich weiter auf den Nachweis des Higgs-Bosons eingehen: Die Existenz des Higgs-Bosons kann mithilfe von Python und ATLAS Open Data durch den $H \rightarrow \gamma\gamma$ Zerfall nachgewiesen werden.

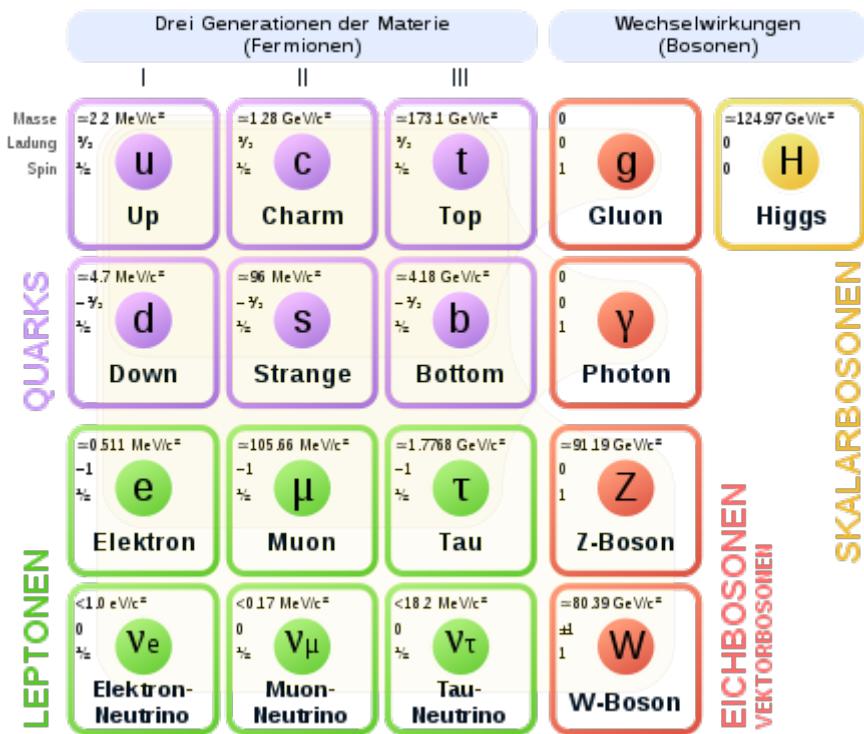
2 Grundlagen

2.1 Standardmodell der Teilchenphysik

Das Standardmodell der Teilchenphysik (SM) ist gegenwärtig die erfolgreichste Theorie der Physik (Abb.1). Es beschreibt den Aufbau der Materie aus einfachen, sehr kleinen Elementarteilchen und ihre Interaktionen. Diese Elementarteilchen werden in unterschiedliche Familien, Generationen und Gruppen eingeteilt. Es existieren sechs Quarks: das Up(u)- und Down(d)-Quark, das Charm(c)- und Strange(s)-Quark und das Top(t)- und Bottom(b)-Quark. Alle Quarks besitzen eine Farbladung, die entweder rot, blau oder grün sein kann oder die jeweilige Anti-Farbe. Zudem besitzen sie eine elektrische Ladung, die bei dem Up-, Charm- und Top-Quark jeweils $+2/3$ beträgt und bei dem Down-, Strange und Bottom-Quark jeweils $-1/3$. Aufgrund ihrer Ladungen (elektrische, Farbladung und schwache Ladung) können sie über die schwache, die starke und die elektromagnetische Kraft wechselwirken. Zudem gehören die Quarks einer Generation an. Die Generationen unterscheiden sich nur an Hand der Masse der Teilchen. Am leichtesten sind das Up- und Down-Quark, die der ersten Generation angehören. Danach kommen das Charm- und Strange-Quark, die der zweiten Generation angehören. Am schwersten sind das Top- und Bottom-Quark, die Teil der dritten Generation sind. Die schweren Quarks zerfallen in die leichteren. Neben den Quarks existieren die Leptonen, welche im Unterschied zu den Quarks keine Farbladung besitzen. Diese werden unterteilt in die elektrisch geladenen und elektrisch neutralen Teilchen. Zu den elektrisch geladenen Teilchen gehören das Elektron, das Myon und das Tauon. Sie alle besitzen eine elektrische Ladung von -1 . Die dazugehörigen neutralen Partner sind die Neutrinos. Diese können nur sehr schwer detektiert werden, da sie nur über die schwache Kraft wechselwirken. Zuletzt sind die Austauschteilchen der Wechselwirkungen, die Bosonen, zu nennen. Es existieren die positiv und negativ geladenen W-Bosonen und das Z-Boson für die schwache Wechselwirkung, das Gluon für die starke Wechselwirkung und das Photon für die elektromagnetische Wechselwirkung. Darüber hinaus gibt es das hypothetische Graviton, das als Wechselwirkungsteilchen der Gravitation infrage kommt. Alle Quarks und Leptonen können als Materieteilchen oder als Anti-Materieteilchen erzeugt werden. Die Anti-Materieteilchen unterscheiden sich nur durch ihre umgekehrte Ladung von den Materieteilchen. In dem SM können alle fundamentalen Kräfte beschrieben werden, abgesehen von der Gravitation.¹

¹ (17) Lemmer, Boris: Bis(s) ins Proton
(11) CERN: The Standard Model

Standard-Modell der Elementarteilchen



[1] Standardmodell der Teilchenphysik

2.2 Elektromagnetische Wechselwirkung

Alle Teilchen, die eine elektrische Ladung besitzen, wechselwirken über die elektromagnetische Wechselwirkung. Durch diese stoßen sich elektrisch geladene Teilchen ab oder ziehen sich an. Zudem werden bei einer Paarvernichtung oder Paarbindung Photonen abgestrahlt. Das Boson der elektromagnetischen Wechselwirkung ist das Photon (γ).²

2.3 Erhaltungssätze

Wie bei vielen Prozessen gelten auch bei der Teilchenumwandlung Erhaltungssätze. Am wichtigsten sind dabei Energie- und Impulserhaltung. Die Energieerhaltung besagt, dass die Gesamtenergie vor und nach einem Zerfall oder nach einer Umwandlung genauso groß sein muss wie vor dem Prozess. Da $E_0 = mc^2$ ist, kommt es häufig bei Zerfällen vor, dass die Masse der leichteren Teilchen zusammengerechnet nicht die Masse des Ausgangsteilchen ergibt. Die fehlende Masse wurde als Energie abgestrahlt. Die Erhaltungssätze ergeben sich aus den Symmetrien des jeweiligen Modells. Die Menge/Ladung nach einem Prozess muss

² (6) Berger, Christoph: Elementarteilchenphysik
(17) Lemmer, Boris: Bis(s) ins Proton

der Ausgangsmenge/Ausgangsladung entsprechen. Energie- und Impulserhaltung können in derselben Berechnung der Kinematik der Teilchen erfüllt werden, mit Vierervektoren.³

2.4 Vierervektoren

In der Physik werden Erhaltungssätze genutzt, um physikalische Probleme zu lösen, indem sie Beschränkungen auf die Berechnungen anwenden. Um Berechnungen zu beschränken, werden Vierervektoren, auch Lorentz Vektoren genannt, verwendet. Ein Vierervektor besteht aus vier Komponenten. In diesem Fall besteht der Vierervektor aus drei räumlichen Koordinaten P_x , P_y und P_z , wobei P für den Impuls steht sowie der vierten Komponente E , der Energie. Der Vierervektor gibt den Impuls für jede Raumachse und die Gesamtenergie des Teilchens an.⁴

$$P^m(E, P_x, P_y, P_z)$$

2.5 Invariante Masse

Die invariante Masse beschreibt die Beziehung zwischen Energie E und Impuls P . Der Impuls lässt sich aus der Geschwindigkeit v , der Masse m und dem Lorentz Faktor γ berechnen.

$$P = \gamma \cdot m \cdot v$$

Die invariante Masse lässt sich aus Einsteins Gleichung zur Äquivalenz von Masse und Energie bei bewegten Objekten ableiten, wobei c die Lichtgeschwindigkeit beschreibt.

$$E^2 = P^2 c^2 + m^2 c^4$$

In der Teilchenphysik werden in Berechnungen natürliche Einheiten benutzt. Für den Impuls und die Masse wird hier mit den Energieeinheiten GeV und MeV gerechnet. Diese vereinfachen die Berechnungen. Für c wird in diesem Fall mit 1 gerechnet. Daraus ergibt sich die vereinfachte Formel:

$$E^2 = m^2 + P^2$$

Diese Formel umgestellt, liefert die invariante Masse:⁵

$$m^2 = E^2 - P^2$$

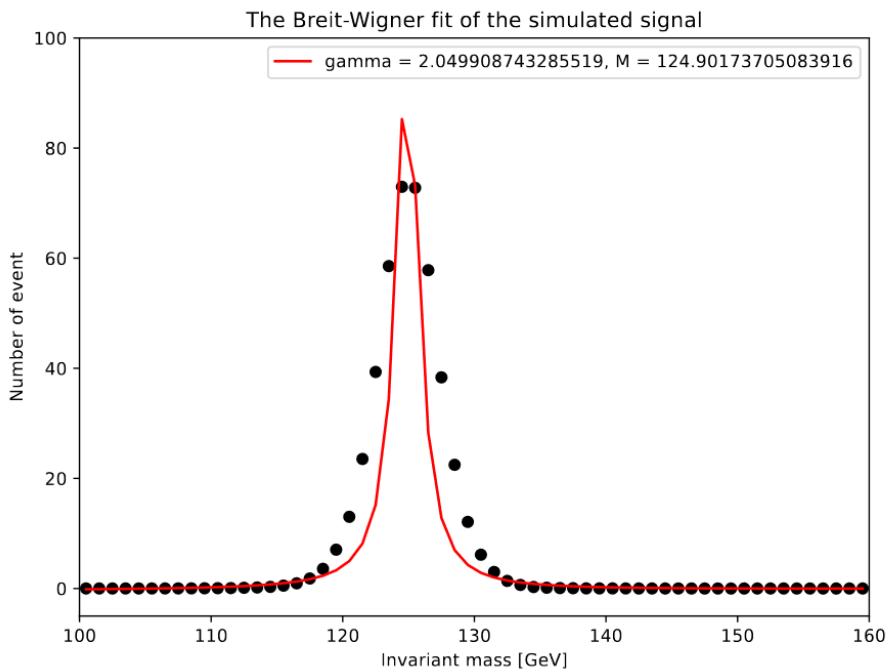
³ (14) DESY: Erhaltungssätze und Symmetrien

⁴ (13) DESY: Einführung

⁵ (13) DESY: Einführung

2.6 Kurvenanpassung (Fit)

Kurvenanpassung oder auch Ausgleichungsrechnung ist eine mathematische Methode, mit der eine Funktion gesucht wird, die zu einer Sammlung von Datenpunkten am besten passt. Das Ziel ist es dabei, kleine Abweichungen mit einzubeziehen. Dafür werden verschiedene Funktionen angewendet und angepasst. Wenn zwei Teilchen kollidieren, können sie einen instabilen Zustand annehmen, der als Resonanzproduktion bekannt ist. Bei einer Resonanzproduktion zerfallen die Teilchen in einen stabileren Zustand oder in einen noch instabileren Zustand. Diese Teilchen haben eine Invariante Masse mit einer Wahrscheinlichkeitsverteilung (Abb.2). Der Querschnitt, welcher die Wahrscheinlichkeit angibt, dass es zu einer Resonanzproduktion kommt, kann mit einer Breit-Wigner-Verteilung beschrieben werden. Diese Verteilung kann zudem verwendet werden, um die Zerfalls-Rate eines instabilen Teilchens abzubilden.⁶



[2] Breit-Wigner fit

⁶(15) Freytag, Carl. Osterhage, Wolfgang: Wie man Elementarteilchen entdeckt

3 Das Higgs

3.1 Higgs-Feld

Durch den Higgs-Mechanismus bekommen die Elementarteilchen ihre Masse. Der Mechanismus erklärt, warum einige Teilchen eine relativ hohe Masse haben und andere gar keine. Die Annahme der Existenz eines Higgs-Feldes ist eine Voraussetzung für den Higgs-Mechanismus. Das Higgs-Feld füllt nach heutigen Kenntnissen den ganzen Raum gleichmäßig aus. Die Elementarteilchen wechselwirken mit dem Higgs-Feld und bekommen dadurch ihre Masse. Dabei wechselwirken die verschiedenen Teilchen unterschiedlich stark mit dem Feld. Je stärker ein Teilchen mit dem Higgs-Feld interagiert, desto höher ist die Masse des Teilchens. Die Teilchen, die gar nicht mit dem Higgs-Feld wechselwirken, haben keine Masse. Dieser Vorgang wird Higgs-Mechanismus genannt.⁷

3.2 Higgs-Boson

Das Higgs-Boson ist das zum Higgs-Feld gehörende Austauschteilchen. Es wurde das erste Mal von Peter Higgs im Jahr 1964 postuliert. Zu dieser Zeit arbeiteten viele Physiker daran, die schwache Wechselwirkung mit Hilfe der Quanten-Feld-Theorie zu beschreiben. Diese Theorie bot bereits die Grundlage für die Beschreibung der elektromagnetischen Wechselwirkung und sollte nun auch als Ansatz für die Beschreibung der schwachen Wechselwirkung dienen. Dabei gab es aber das fundamentale Problem, dass die Theorie Teilchen nicht erlaubt, eine Masse zu besitzen. Es war aber wichtig, dass vor allem die Austauschteilchen der schwachen Wechselwirkung (W , Z -Boson) eine bestimmte Masse besitzen, um mit ihrer kurzen Reichweite vereinbar zu sein. Die Masse des Austauschteilchens der elektromagnetischen Wechselwirkung war nicht relevant, da ein Photon keine Masse besitzt. Damit herrschte ein Symmetriebruch. Für die Lösung dieses Problems schlugen Higgs, Brout und Englert den Higgs-Mechanismus vor. Dieser Mechanismus hatte zwei Hauptkomponenten, ein neues Quantenfeld (das Higgs-Feld) und einen spontanen Symmetriebruch. Da sich Teilchen in einem Quantenfeld (hier Higgs-Feld) als Welle darstellen lassen, bedeutete das die Existenz eines Austauschteilchens, das Higgs-Boson. Es wird auch wegen der Funktionsweise des Higgs-Mechanismus als Teilchen der Trägheit bezeichnet.⁸

⁷ (5) Baggot, Jim: Higgs. The invention and Discovery of the ‘God Particle’

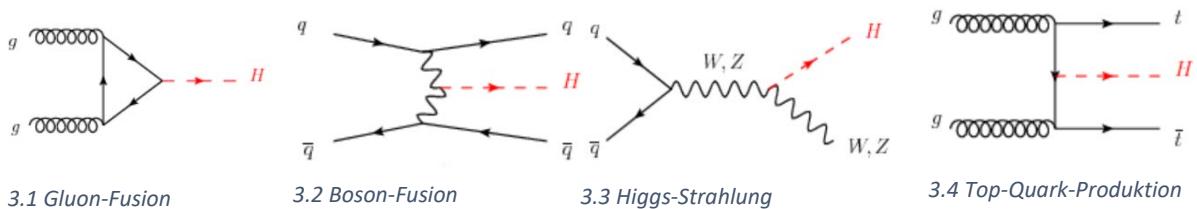
(7) CERN: Higgs Physics

⁸ (2) ATLAS Open Data: Brief introduction to the Higgs Boson

(17) Lemmer, Boris: Bis(s) ins Proton

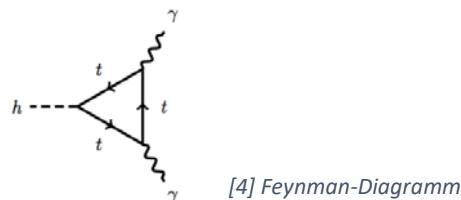
3.3 Higgs Produktion

Das Higgs wird auf verschiedene Weisen im LHC produziert. Es kann durch die Fusion von zwei Gluonen g an einen Loop koppeln. Das Higgs koppelt sich an den Loop, da es sich nicht an masselose Teilchen koppeln kann. Meist handelt es sich um einen Top-Loop oder Bottom-Loop, da sich das Higgs meist an schwerere Teilchen koppelt (Abb. 3.1). Das Higgs kann zudem über die Fusion von Bosonen der schwachen Wechselwirkung (Abb.3.2), die Produktion über die Higgs-Strahlung (Abb.3.3) und über die assoziierte Produktion mit Top-Quarks produziert werden (Abb.3.4).⁹



3.4 Higgs Zerfälle

So wie das Higgs auf verschiedene Weisen produziert werden kann, kann es auch auf verschiedene Weisen zerfallen. Am häufigsten, in 57% der Zerfälle, zerfällt das Higgs in ein Bottom-Anti-Bottom Paar. Einer der Zerfalls-Channel, der genutzt wurde, um das Higgs das erste Mal nachzuweisen, ist dennoch der $H \rightarrow \gamma\gamma$. Bei diesem Zerfall koppelt sich das Higgs an einen Top- oder Bottom-Loop und zerfällt danach in zwei Photonen (Abb.4).



Dieser Zerfall kommt nur in 0,2% der Zerfälle vor. Das Higgs kann zudem in verschiedene Quarks und Bosonen zerfallen.¹⁰

3.5 Statistischer Nachweis des Higgs-Bosons

Das Higgs-Boson hat eine Masse von 125 GeV und eine kurze Lebensdauer von nur 10^{-22} Sekunden. Es kann also nur in einem Teilchenbeschleuniger erzeugt werden und kommt nicht in der „Natur“ vor. Da das Higgs nur eine kurze Lebensdauer hat, kann es zudem nicht direkt von Detektoren nachgewiesen werden. Das Higgs zerfällt in andere Elementarteilchen bevor, es auf den Detektor trifft. Nur die Teilchen, in die das Higgs zerfällt, können detektiert

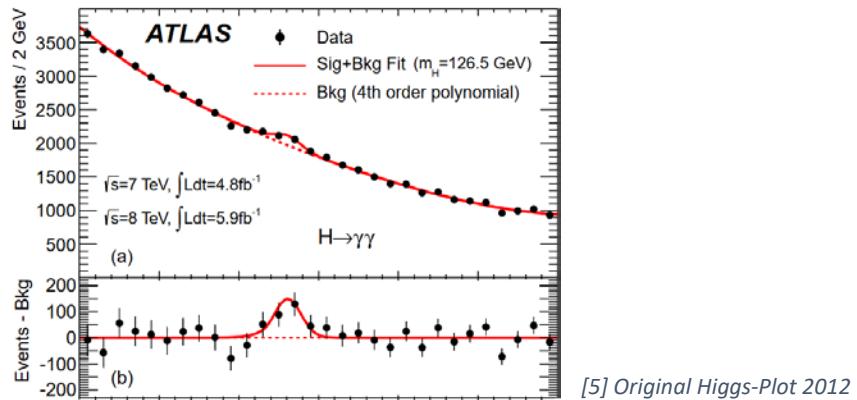
⁹ (4) ATLAS: What is the Higgs boson and why does it matter?

(7) CERN: Higgs Physics

¹⁰ (19) ResearchGate: Feynman Diagram

(12) CERN: What's so special about the Higgsboson?

werden. Das Higgs kann also nur durch Rückschlüsse identifiziert werden. Ereignisse zu identifizieren, die einen Higgs-Zerfall zeigen, ist relativ schwierig, da ein Higgs-Zerfall nur einmal in einer Milliarde Ereignissen vorkommt. Besonders schwierig ist es zudem zu entscheiden, welcher Zerfall ein Higgs-Zerfall war. Es ist aber möglich, das Higgs nachzuweisen, nachdem genügend mögliche Zerfälle gemessen wurden. Aus den möglichen Zerfällen konnten die Eigenschaften des Higgs ermittelt und die invariante Masse berechnet werden. Die invariante Masse des Higgs kann nur bei den Teilchen gemessen werden, die aus einem Higgs-Zerfall stammen. Bei allen anderen Teilchen, die detektiert werden, ist diese Masse zufällig in einem Bereich möglicher Massen. Dadurch entstehen viele zufällige Ergebnisse und einige wenige, die eine Wahrscheinlichkeitsverteilung angeben. Diese Wahrscheinlichkeitsverteilung ist normalerweise eine Breit-Wigner-Verteilung. In diesem Fall ist die Wahrscheinlichkeitsverteilung aber eine Gauß-Kurve (Normalverteilung), da zu der Wahrscheinlichkeitsverteilung verschiedene Unsicherheiten hinzukommen, z.B. Unsicherheiten im Detektor. Da alle Werte, abgesehen von der invarianten Masse, zufällig sind, wird dieser Wert häufiger gemessen als die der zufälligen Ereignisse. Diese Ergebnisse werden statistisch analysiert und dann als Histogramm geplottet (Abb.5). Das Higgs-Signal taucht dann in diesem Plot als „Spitze“ (Peak) an einer bestimmten Stelle auf.



Damit dieser Nachweis funktioniert, müssen die „Spitze“ groß genug sein und genügend Daten ausgewertet werden. Am 04. Juli 2012 wurde die Fünf-Sigma-Schwelle für das Experiment der ATLAS und CMS-Kooperation überschritten. Sigma gibt an, wie sicher es ist, dass das Signal existiert und nicht nur eine zufällige Variation ist. Bei Fünf-Sigma liegt die Wahrscheinlichkeit bei etwa eins zu 3,5 Millionen, dass das Ergebnis nur eine zufällige Variation ist. Damit galt das Higgs 50 Jahre, nachdem es von Peter Higgs und seinen Kollegen postuliert wurde, als nachgewiesen.¹¹

¹¹(4) ATLAS: What is the Higgs boson and why does it matter?

(17) Lemmer, Boris: Bis(s) ins Proton

(16) Gray, Heather/Mansoulié, Bruno: The Higgs boson

4 Teilchenbeschleuniger und Detektoren

4.1 LHC (Large Hadron Collider)

Der LHC ist der größte Teilchenbeschleuniger der Welt und Teil des CERN. Er wurde in der Schweiz an der Grenze zu Frankreich gebaut. Der Beschleuniger wurde am 10. September 2010 in Betrieb genommen. Am LHC werden Protonen in zwei Richtungen auf fast Lichtgeschwindigkeit beschleunigt und in Detektoren zur Kollision gebracht. Damit das möglich ist, wurde er als 27km langer Ringbeschleuniger mit mehreren Vorbeschleunigern gebaut. Nachdem die Protonen, die aus einer Wasserstoffflasche stammen, in einem Linearbeschleuniger beschleunigt werden, werden sie in mehreren kleineren Ringbeschleunigern auf 450 GeV beschleunigt. Der LHC ist darauf ausgelegt, die Protonen auf bis zu 14 TeV weiter zu beschleunigen. Die Protonen werden im LHC in beide Richtungen beschleunigt, damit die Gesamtenergie am Kollisionspunkt so hoch ist wie möglich, da die Energien der beiden Teilchenpakete addiert werden. Um Teilchen zu beschleunigen, fliegen die Protonen durch elektrische Hochspannungsfelder, die abwechselnd negativ und positiv geladen sind. Zuerst wird das Teilchen von einem negativen Feld angezogen. In dem Moment, in dem sich das Teilchen in dem ersten Feld befindet, schaltet die Spannung um. Das erste Feld ist nun positiv und stößt das Teilchen ab, während es von dem nächsten, jetzt negativ geladenen Feld, angezogen wird. Je schneller das Teilchen wird, desto schneller muss die Frequenz werden, in der das Feld umgeschalten wird. Diese Beschleunigung der Teilchen findet in den Kavitäten statt. Am LHC gibt es insgesamt nur acht Kavitäten, da nur ein sehr geringer Teil des LHC zum Beschleunigen genutzt wird. Ein Proton durchläuft den kompletten LHC 11.245mal pro Sekunde, die Protonen können also genauso oft pro Sekunde beschleunigt werden. Ein Ringbeschleuniger macht es zudem möglich, dass die Teilchen immer wieder beschleunigt werden können, da sich die Teilchen auf einer Kreisbahn befinden. Um den Teilchenstrahl (Beam) auf eine Kreisbahn zu lenken, werden supraleitende Ablenk Magnete verwendet, um ein Magnetfeld zu erzeugen. Zudem lösen die Magnete ein weiteres Problem. Je größer die Geschwindigkeit v wird, desto größer wird der Kreisradius r . Durch die Magnete ist es aber möglich, den Radius konstant zu halten, auch wenn die Geschwindigkeit wächst. Das Magnetfeld B muss erhöht werden, während die Teilchen beschleunigt werden. Damit ein großes Magnetfeld erzeugt werden kann, wie für den LHC benötigt wird, werden 12.000 A gebraucht. Zudem sollen elektrisch leitende Materialien am LHC ihren Widerstand verlieren durch die Supraleitung. Die Supraleitung tritt bei Nibo-Titan erst bei -271°C ein und nur bestimmte Kabel können unter Kühlung überhaupt zu Supraleitern werden. Wegen dieser beiden

Punkte muss der LHC auf -271°C (2K) heruntergekühlt werden. Diese Kühlung erfolgt mithilfe von 10.000 Tonnen flüssigem Stickstoff und 120 Tonnen Helium. Im LHC herrscht ein fast perfektes Vakuum, damit die Teilchen ungehindert beschleunigt werden können und die Ergebnisse nicht verfälscht werden. Damit die beiden Strahlen im LHC sich genau in einem Detektor treffen, müssen die Strahlen perfekt ausgerichtet werden. Das ist möglich mit der Hilfe von Quadropolmagneten. Jeder Quadropolmagnet hat zwei Südpole und zwei Nordpole. Damit kann der Strahl in einem Quadropolmagnet nur auf der Horizontalen oder Vertikalen ausgerichtet werden. Um eine gleichmäßige Ausrichtung der Strahlen zu erreichen, werden mehrere Quadropolmagnete hintereinander gebaut und immer um 90° gedreht. Neben dem LHC muss auch der Strahl gekühlt werden.¹²

4.2 ATLAS (A Toroidal LHC Apparatus) Detektor

Am CERN gibt es insgesamt sieben Experimente. Die vier größten Experimente sind LHCb, ALICE, CMS und ATLAS. Das ATLAS Experiment ist einer der größten und komplexesten Detektoren, die je gebaut wurden, mit einer Länge von 46m und einer Höhe von 25m. Er ist der einzige größere Detektor, der sich auf Schweizer Seite des LHC befindet. Im Detektor wird versucht, die Bedingungen kurz nach dem Urknall so gut wie möglich nachzuahmen, um herauszufinden, welche Teilchen kurz nach dem Urknall existiert haben. Die meisten schweren Teilchen, die erzeugt werden, haben eine kurze Lebensdauer. Deswegen ist es nicht möglich, diese Teilchen direkt nachzuweisen. Um aber auch die etwas langlebigeren Teilchen nachzuweisen, ist der ATLAS Detektor aus mehreren Schichten aufgebaut. Nach einer Kollision hinterlassen die Teilchen Spuren in den verschiedenen Schichten. Der ATLAS Detektor besteht aus drei Grundschichten: dem Inneren Detektor, dem Kalorimeter und dem Myon System. Am nächsten am Kolisionspunkt befindet sich der Innere Detektor. Der Innere Detektor besteht aus dem Pixeldetektor, dem Semi Conductor Tracker (SCT) und dem Transition Radiation Tracker (TRT). Dort werden die Teilchenspuren nach ihrem Impuls und ihrer Ladung von ihrer Bahn abgelenkt. Da das Magnetfeld bekannt ist, kann der Impuls der Teilchen rekonstruiert werden. Zudem wird der Entstehungsort der Teilchen rekonstruiert, so können Teilchenspuren von elektrisch geladenen Teilchen (vor allem schwere Quarks) identifiziert werden. Danach gibt es das elektromagnetische Kalorimeter (ECAL). Das ECAL ist dafür zuständig, die Energien von Photonen und Elektronen zu

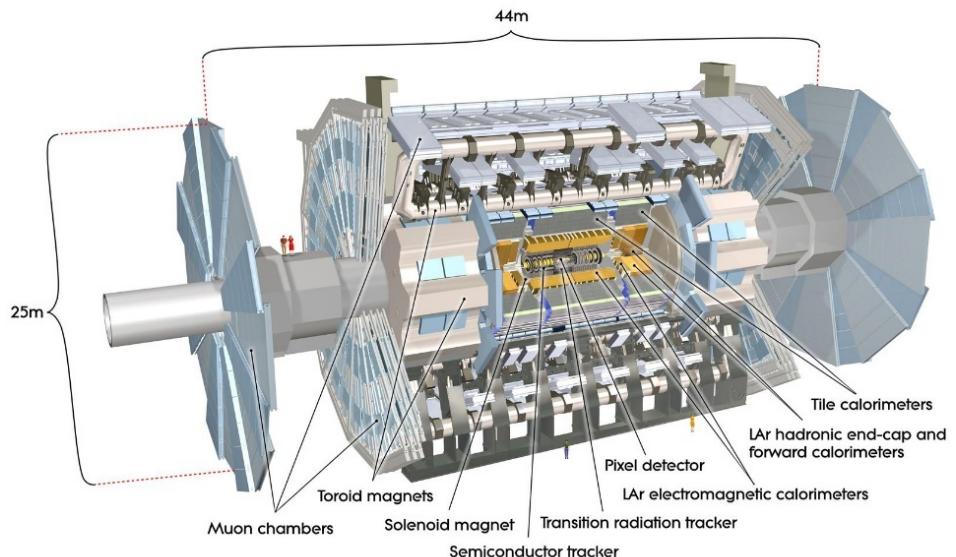
¹²(17) Lemmer, Boris: Bis(s) ins Proton

(9) CERN: Pulling together: Superconducting electromagnets

(10) CERN: The Large Hadron Collider

(20) Lemmer, Boris (Science Slam): -Elementarteilchen-Bis(s) ins Proton

messen, die in dieser Schicht absorbiert werden. Das zweite Kalorimeter ist das Hadronische Kalorimeter (HCAL). Das HCAL misst die Energie der Hadronen. Die Hadronen haben nur einen kleinen Teil ihre Energie im ECAL vorher verloren. In den Myonenkammern werden nur Myonen detektiert. Sie sind die einzigen Teilchen, die ihrer Energie vorher noch nicht verlieren. Es ist auch hier möglich, den Impuls der Myonen mit Hilfe eines Magnetfeldes zu bestimmen. Der Detektor ist ringförmig um den Kollisionspunkt aufgebaut. Die verschiedenen Teilchen hinterlassen in den unterschiedlichen Schichten Spuren. Elektronen und Positronen hinterlassen Spuren im Inneren Detektor und verlieren ihre komplette Energie im ECAL. Jets (Teilchenbündel aus Hadronen) können durch mehrere Spuren im Inneren Detektor und durch ihre Energieabgabe im ECAL und HCAL nachgewiesen werden. Myonen und Anti-Myonen sind die einzigen Teilchen, die Spuren in allen Detektorschichten hinterlassen. Im Inneren Detektor hinterlassen vor allem schwere Quarks und Mesonen Spuren. Die Kollisionen werden als Fotos abgespeichert, auf denen die Spuren abgebildet sind.¹³



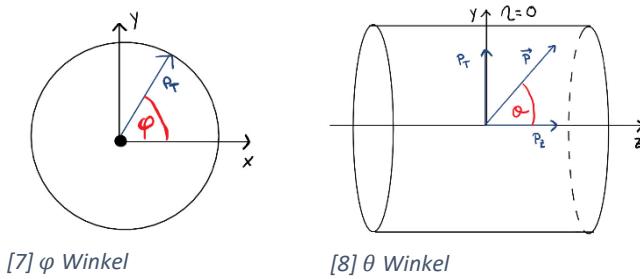
[6] ATLAS Detektor Layout

¹³ (1) ATLAS: Glossary

(15) Freytag, Carl. Osterhage, Wolfgang: Wie man Elementarteilchen entdeckt
 (18) LHC: Atlas Experiment

4.3 ATLAS Koordinatensystem

Wenn man die Spuren der Teilchen analysiert, findet man den θ (Theta) und φ (phi) Winkel. Der φ Winkel wird von der x-Achse aus um den Strahl herum gemessen. Der Winkel θ wird zwischen der X-Achse und Z-Achse gemessen.



ATLAS besitzt ein rechtshändiges Koordinatensystem. Die X-Achse zeigt in Richtung Zentrum des LHC-Tunnels und die Z-Achse zeigt den Tunnel entlang. Alle drei Achsen sind orthogonal zueinander. Zusammen mit der Information über den transversalen Impuls, den man dadurch bestimmen kann, wie stark die Spur gebogen ist, kann man den Impuls P des Teilchens in einem kartesischen Koordinatensystem bestimmen.

$$P_x = P_T \cdot \cos \varphi, P_y = P_T \cdot \sin \varphi, P_z = \frac{P_T}{\sin \theta} \cdot \cos \theta = P_T \cdot \cot \theta$$

In dem Experiment wird θ als Pseudorapidity η (eta) gemessen. Mit der Pseudorapidity wird der Winkel eines Teilchens relativ zur Strahlungsachse beschrieben.

$$\eta = -\ln(\tan \frac{\theta}{2})$$

Zusammen mit der gemessenen Energie der Teilchen kann der Vierervektor der Teilchen bestimmt werden.¹⁴

$$P^m(E, P_T \cdot \cos \varphi, P_T \cdot \sin \varphi, P_T \cdot \cot \theta)$$

¹⁴ (1) ATLAS: Glossary

(6) Berger, Christoph: Elementarteilchenphysik

5 Nachweis des Higgs-Bosons in Python

5.1 Event Selektion in Python

Während der Event Selektion werden ca. 8 Millionen $\gamma\gamma$ Events in einem Python Code überprüft. Es wird überprüft, ob es sich um ein potentielles $H \rightarrow \gamma\gamma$ Event handelt. Also ob die zwei detektierten Photonen wirklich aus einem Higgs-Zerfall stammen. Als erstes wird überprüft, ob die Photonen einen größeren transversalen Impuls besitzen, um niederenergetische Photonen aus anderen Zerfällen auszuschließen:

$$P_{T,\gamma_1} > 40 \text{ GeV} \text{ und } P_{T,\gamma_2} > 30 \text{ GeV}$$

In einem zusammenhängenden Event beschreibt γ_1 das Photon mit der größten transversalen Energie und γ_2 beschreibt das Photon mit der zweitgrößten transversalen Energie. Des Weiteren muss bestätigt werden, ob das Photon in der zentralen Region des Detektors detektiert wurde:

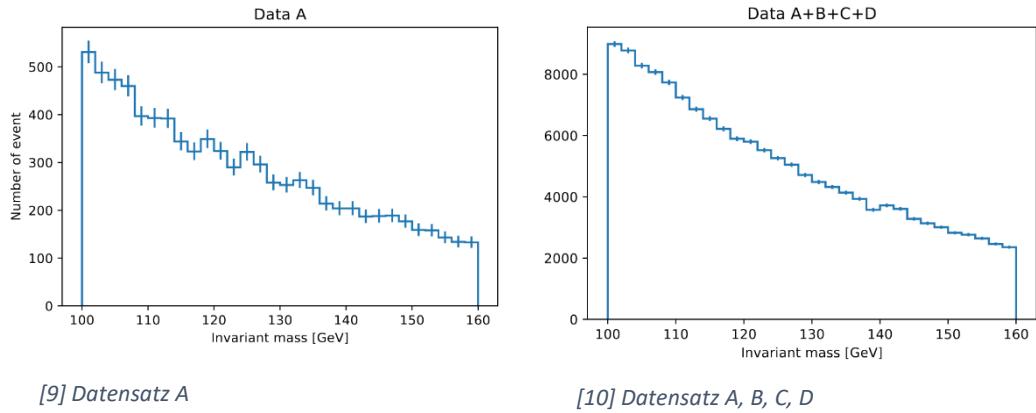
$$|\eta_\gamma| < 2,37^\circ$$

Das Photon darf zudem nicht in der Übergangsregion zwischen dem Inneren Detektor und dem ECAL gemessen werden:

$$1,37^\circ \leq |\eta_\gamma| > 1,52^\circ$$

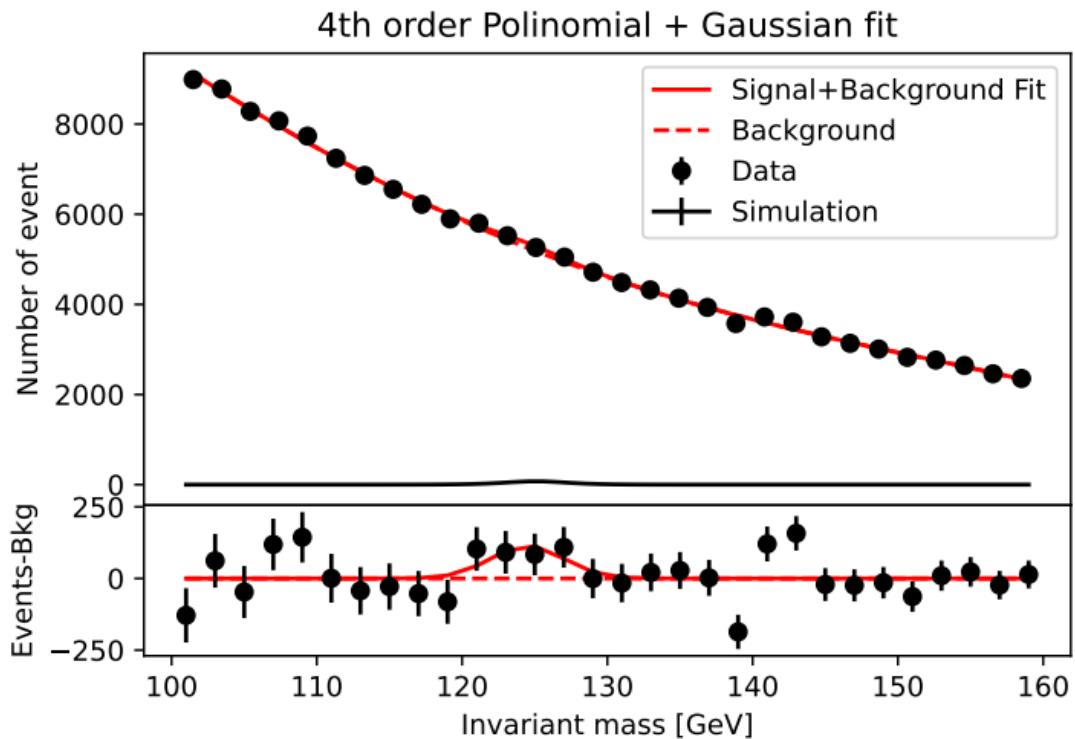
Photonen werden anhand ihrer Spuren im Detektor identifiziert. Physiker nutzen dabei eine Einteilung, um zu bestimmen, wie gut die Photonen detektierbar sind. In diesem Fall muss das Photon „tight“ sein. Zudem müssen die Photonen isoliert von anderen Teilchen sein. Um die Isolation eines Photons zu bestimmen, wird ein hypothetischer Kegel um das Photon herum berechnet. In dem Bereich des Kegels darf die transversale Energie nicht größer als ein festgelegter Wert sein. Dabei wird die transversale Energie des Photons nicht dazugezählt. Ist das Photon isoliert genug, wird der Vierervektor des Photons bestimmt. Aus dem Vierervektor wird dann die Invariante Masse von zwei Photonen berechnet und in einem Histogramm geplottet. Dieser Prozess wird mit vier Datensätzen mit unterschiedlich vielen Events durchgeführt, wobei die Datensätze in einem Plot addiert werden. Wie hier am Beispiel des Datensatzes A (Abb.9), in dem 430344 Events enthalten sind. Die Datensätze A und Datensatz D (3602175 Events) werden schließlich mit den Datensätzen B (1528717 Events) und C (2237187 Events) zu einem Histogramm zusammengeführt (Abb.10). Auf der X-Achse ist die Invariante Masse abgetragen und auf der Y-Achse die Anzahl der gemessenen Events.¹⁵

¹⁵ (3) ATLAS Open Data: Open Data Analysis



5.2 Higgs Fit

Um das Higgs Boson in dem geplotteten Diagramm zu identifizieren, muss der Background von dem Higgs-Signal differenziert werden. Der Background wird mit Hilfe einer Quadratischen Funktion beschrieben. Das Higgs-Signal wird mit einer Gauß-Verteilung beschrieben, da es viele unterschiedliche Unsicherheiten und Fehler von verschiedenen Quellen gibt. Das Higgs-Signal differenziert vom Background ist im unteren Bereich des Plots abgebildet unter der Beschriftung Events-Bkg. Wenn beide Fits implementiert werden, findet man einen eindeutigen Peak.



[11] Histogramm Invariante Masse Higgs

Dieser Peak liegt bei einer Invarianten Masse von ca. 125 GeV. Es handelt um die Invariante Masse von zwei Photonen aus einem $H \rightarrow \gamma\gamma$ Zerfall und damit auch um die Invariante Masse des Higgs-Bosons. Schließlich kann die Signifikanz des Peaks mit 1,3 Sigma berechnet werden. Um die Signifikanz zu berechnen muss die Anzahl der gemessenen Events durch die Wurzel der Anzahl der Background-Events geteilt werden. Mithilfe von simulierten Daten, den Monte Carlo Daten, kann die Signifikanz auch berechnet werden. Die Monte Carlo Daten sind als schwarze Linie in dem Higgs-Plot mit abgebildet.¹⁶

5.3 Bedeutung der Invarianten Masse des Higgs bei 125 GeV

Dass der Peak bei 125 GeV auftaucht, bestimmt wesentliche Eigenschaften für unser Verständnis des Universums mit. Vor dem Nachweis des Higgs gab es mehrere Vermutungen, bei welcher Invarianten Masse das Higgs liegen könnte. Ein Teil der Physiker glaubte, dass die Invariante Masse bei ca. 115 GeV liegt. Das hätte bedeutet, dass Theorien wie Supersymmetrie greifen würden und dass es noch viele weitere Elementarteilchen gibt. Viele Wissenschaftler haben auf ein „leichteres“ Higgs gehofft. Andererseits gab es auch die Theorie, dass das Higgs bei einer Masse von ca. 140 GeV liegt. Das wäre für viele katastrophal gewesen. Um so eine Invariante Masse erklären zu können, bräuchte man Theorien, die das Multiversum miteinschließen. Zudem hätte es bedeuten können, dass das Higgs das letzte unentdeckte Elementarteilchen ist. Dies wiederum würde bedeuten, dass es noch weniger Erklärungen für Dunkle Materie und Dunkle Energie gäbe. Am Ende liegt das Higgs mit einer Masse von 125 GeV in der Mitte dieser beiden Vermutungen und lässt viele Theorien zu und Spekulationen über unser Universum offen.¹⁷

¹⁶ (3) ATLAS Open Data: Open Data Analysis

¹⁷ (21) Levinson, Mark: Particle Fever - Die Jagd nach dem Higgs

6 Fazit

Meine erste These, es ist möglich, dass das Higgs-Boson in zwei Photonen ($H \rightarrow \gamma\gamma$) zerfällt, hat sich bestätigt. Obwohl das Higgs nur in 0,2% aller Zerfälle in zwei Photonen zerfällt, ist es einer der vielen möglichen Higgs-Zerfälle. Zudem ist ein $H \rightarrow \gamma\gamma$ Zerfall im Vergleich zu den meisten anderen Zerfällen einfacher zu identifizieren. Unter anderem mit $H \rightarrow \gamma\gamma$ Zerfällen wurde das Higgs das erste Mal nachgewiesen. Mit Hilfe dieses Zerfalls ist es möglich, einen Plot mit einem erkennbaren Higgs-Peak mit ATLAS Open Data in Python zu erstellen. Dabei kann die Invariante Masse des Higgs von 125 GeV aus dem Plot abgelesen werden. Der Peak hat dabei eine Signifikanz von 1,3 Sigma, dieser Wert ist nicht groß genug, um den Nachweis des Higgs zu bestätigen. Dennoch ist ein Peak deutlich erkennbar, auch wenn dieser nicht so ausgeprägt ist wie im Higgs-Plot von 2012. Damit lässt sich meine zweite These, die Existenz des Higgs-Bosons kann mithilfe von Python und ATLAS Open Data durch den $H \rightarrow \gamma\gamma$ Zerfall nachgewiesen werden, nur teilweise bestätigen. Der Unterschied in der Ausprägung ist auf die Anzahl der verwendeten Daten zurückzuführen. Es wurden von den Daten, welche während der zweiten Laufzeit des LHC (Run-2) aufgezeichnet wurden, nur 0,79% für die Analyse verwendet. Der LHC hatte während dieser zweiten Laufzeit eine Schwerpunktsergie von 13 TeV.

Insgesamt ist es beeindruckend, wie ähnlich mein Plot zu dem Original Higgs-Plot ist, auch wenn die Signifikanz deutlich geringer ist. Durch diese Arbeit hatte ich die Möglichkeit zu erleben, wie Wissenschaftler in diesem Bereich der Physik arbeiten. Dabei haben sich mir viele weitere Fragen offenbart. Gibt es noch mehr unentdeckte Elementarteilchen? Wie sieht die Physik jenseits des Standardmodells aus? Trotz dieser offenen Fragen konnte ich in kleinem Rahmen das Higgs für mich entdecken. Ungefähr 10 Jahre nach dem ersten Nachweis des Higgs konnte ich mit der Bearbeitung meines Themas die Faszination und die Vielfältigkeit, die das Higgs umgeben, erleben.

7 Quellenverzeichnis

7.1 Literaturverzeichnis

- 1 ATLAS: Glossary. In: <http://opendata.atlas.cern/books/current/gestarted/book/GLOSSARY.html> [24.01.2023]
- 2 ATLAS Open Data: Brief introduction to the Higgs Boson. In: <http://opendata.atlas.cern/release/2020/documentation/physics/the-higgs-boson.html> [27.12.2022]
- 3 ATLAS Open Data: Open Data Analysis In: <https://atlas.cern/Resources/Opendata> [01.02.2023]
- 4 ATLAS: What is the Higgs boson and why does it matter? In: <https://atlas.cern/Discover/Physics/Higgs> [20.01.2023]
- 5 Baggot, Jim: Higgs. The invention and Discovery of the ‘God Particle’. Oxford University Press, Oxford 2012
- 6 Berger, Christoph: Elementarteilchenphysik. Von den Grundlagen zu den modernen Experimenten. Springer, Berlin-Heidelberg, 2002
- 7 CERN: Higgs Physics. In: <https://cds.cern.ch/record/2243593/plots> [01.02.2023]
- 8 CERN: How did we discover the Higgs boson? In: <https://home.cern/science/physics/higgs-boson/how> [19.10.2022]
- 9 CERN: Pulling together: Superconducting electromagnets. In: <https://www.home.cern/science/engineering/pulling-together-superconducting-electromagnets>
- 10 CERN: The Large Hadron Collider. In: <https://www.home.cern/science/accelerators/large-hadron-collider> [20.10.2022]
- 11 CERN: The Standard Model. In: <https://www.home.cern/science/physics/standard-model> [18.10.2022]
- 12 CERN: What’s so special about the Higgsboson? In: <https://home.cern/science/physics/higgs-boson/what> [18.10.2022]
- 13 DESY: Einführung. In: <https://www-zeuthen.desy.de/~kolanosk/ket0708/skript/grundl01.pdf>

- 14 DESY: Erhaltungssätze und Symmetrien. In:
<https://www-zeuthen.desy.de/~kolanosk/ket0708/skript/conserv.pdf>
- 15 Freytag, Carl. Osterhage, Wolfgang: Wie man Elementarteilchen entdeckt. Vom Zyklotron zum LHC- Ein Streifzug durch die Welt der Teilchenbeschleuniger. Springer, Berlin-Heidelberg 2016
- 16 Gray, Heather/Mansoulié, Bruno: The Higgs boson: the hunt, the discovery, the study and some future perspectives. In: <https://atlas.cern/updates/feature/higgs-boson> [21.10.2022]
- 17 Lemmer, Boris: Bis(s) ins Proton. Ein Science Slam durch die Welt der Elementarteilchen, der Beschleuniger und Supernerds. Springer Spektrum, Berlin-Heidelberg 2014
- 18 LHC: Atlas Experiment. In: <https://www.lhc-facts.ch/index.php?page=atlas> [20.10.2022]
- 19 ResearchGate: Feynman Diagram. In:
https://www.researchgate.net/figure/Example-of-a-Feynman-diagram-with-Higgs-boson-h-0-decaying-to-photons-g-via-bottom-quark_fig1_343268935 [01.02.2023]
- 20 Wikimedia: Elementarteilchen des Standardmodells. In
https://de.wikipedia.org/wiki/Standardmodell_der_Teilchenphysik#/media/Datei:Standard_Model_of_Elementary_Particles-de.svg [20.01.2023]

Videoquellen:

- 21 Lemmer, Boris (Science Slam): -Elementarteilchen-Bis(s) ins Proton. (Platz 1). In:
<https://www.youtube.com/watch?v=v-9SSg4DpcI> [19.10.2022]
- 22 Levinson, Mark: Particle Fever - Die Jagd nach dem Higgs. In:
<https://www.youtube.com/watch?v=WWhHlxhNn58> [19.01.2023]

7.2 Bildnachweis

- [1] Standardmodell der Teilchenphysik (Quelle: Wikimedia)
- [2] Simuliertes Signal mit Breit-Wigner fit
- [3] Feynman-Diagramme Higgs-Produktionen (Quelle: CERN)
- [4] Feynman-Diagramm Higgs-Zerfall $H \rightarrow \gamma\gamma$ (Quelle: ResearchGate)
- [5] Original Higgs-Plot 2012 (Quelle: ATLAS)
- [6] ATLAS Detektor Layout (Quelle: ATLAS)
- [7] φ Winkel im ATLAS Detektor
- [8] θ Winkel im ATLAS Detektor
- [9] Histogramm Datensatz A
- [10] Histogramm Datensatz A, B, C, D
- [11] Histogramm Invariante Masse Higgs

8 Danksagung

An dieser Stelle möchte ich mich bei jedem bedanken, der mich in der Erstellung dieser Facharbeit unterstützt hat. Als erstes möchte ich mich beim Team des Netzwerkes Teilchenwelt dafür bedanken, dass sie dieses Projekt möglich gemacht haben und mich in jeglicher Weise bei der Organisation und Umsetzung unterstützt haben.

Des Weiteren bedanke ich mich bei Elisabeth Herrnschier, die mir von Anfang an bei diesem Projekt zur Seite gestanden hat.

Am meisten möchte ich mich bei Orçun Kolay bedanken, der mich durch das ganze Projekt geleitet hat und mich sowohl im Bereich der Physik als auch im Bereich des Programmierens auf meinen jetzigen Wissensstand gebracht hat und dabei nie die Geduld verloren hat.

9 Selbstständigkeitserklärung

Ich, Jakob Walter, erkläre, die vorliegende Arbeit „Nachweis des Higgs-Bosons in $H \rightarrow \gamma\gamma$ Zerfällen“ selbstständig und nur mit den angegebenen Hilfsmitteln angefertigt zu haben.

Radebeul, 26.02.2023

Unterschrift