

Search for $H \rightarrow W^\pm W^\mp(*) \rightarrow \ell^+ \nu \ell'^- \bar{\nu}'$ Decays in the Gluon Fusion and Vector-Boson Fusion Production Modes at the LHC.

Andreas Walz

- durchgeführt in der Gruppe für Experimentelle Teilchenphysik von Prof. Jakobs -

Im Rahmen der vorliegenden Diplomarbeit hatte ich die Gelegenheit, am ATLAS-Experiment am Europäischen Kernforschungszentrum (CERN) in Genf zu arbeiten und mich an der Datenanalyse zur Suche nach dem seit langer Zeit vorhergesagten Higgs-Boson zu beteiligen. Bis zu der Entdeckung eines Higgs-ähnlichen Teilchens im Sommer 2012 am CERN war das Higgs-Boson das letzte Elementarteilchen des bis heute äußerst erfolgreichen Standardmodells der Teilchenphysik, dessen experimenteller Nachweis noch ausstand. Dabei stellt das Higgs-Boson das phänomenologische Merkmal der populärsten Variante dar, die elektroschwache Symmetrie zu brechen: des Higgs-Mechanismus. Die Brechung dieser in der Theorie des Standardmodells der Teilchenphysik verankerten Symmetrie ist notwendig, um in dessen Rahmen die Masse der Elementarteilchen erklären zu können.

Das ATLAS-Experiment ist eines von vier großen Hochenergieexperimenten, welche am *Large Hadron Collider* (LHC) am CERN installiert sind und von denen für zwei, darunter das ATLAS-Experiment, die Suche nach dem Higgs-Boson einen zentralen wissenschaftlichen Auftrag darstellt. Mit dem LHC werden Protonen beschleunigt und mit einer Schwerpunktsenergie von bis dahin maximal 8 Teraelektronenvolt (TeV) zur Kollision gebracht. Durch diese hochenergetischen (inelastischen) Zusammenstöße wird eine Vielzahl anderer Teilchen produziert, die z.B. mit den Teilchendetektoren des an einem Kollisionspunkt installierten ATLAS-Experiments registriert und analysiert werden können. Mit komplexen Algorithmen werden aus der Reaktion von ca. 100 Millionen Messkanälen einzelne Teilchen rekonstruiert und versucht, auf den elementaren physikalischen Prozess, der bei der Kollision stattgefunden hat, zu schließen.

Der Nachweis eines Higgs-ähnlichen¹ Teilchens gelang über eine statistische Analyse von Proton-Proton-Kollisionen, bei denen Teilchensignaturen gesucht und registriert wurden, welche denen ähnelten, welche von einem Zerfall des Higgs-Bosons erwartet wurden. Dabei wurde ausgenutzt, dass das Standardmodell genaue Vorhersagen über das Verhalten des Higgs-Bosons erlaubt, solange eine Annahme für dessen Masse m_H gemacht wird, welche einen bis dahin noch unbekanntem Parameter darstellt. Daher mussten die Analysen so konzipiert sein, dass sie den möglichen Massenbereich optimal abdecken können. Hierbei erlaubt der vollständige Zerfall in nachweisbare Teilchen, z.B. in vier Elektronen oder Myonen ($H \rightarrow ZZ^{(*)} \rightarrow \ell\ell\ell\ell$) bzw. in zwei Photonen ($H \rightarrow \gamma\gamma$), eine Rekonstruktion der Masse des Higgs-Bosons. Mit Daten aus den Jahren 2011 und 2012 konnte das ATLAS-Experiment entsprechend für sich alleine mit einer statistischen Signifikanz von nahezu 6σ , d.h. mit einer

¹Von einem *Higgs-ähnlichen Teilchen* wird solange gesprochen, bis alle für das Higgs-Boson des Standardmodells relevanten Eigenschaften verifiziert werden konnten.

Wahrscheinlichkeit von weniger als $1.7 \cdot 10^{-9}$, dass nur eine statistischen Fluktuation gemessen wurde, die Entdeckung eines neuen Teilchens vermelden und dessen Masse auf einen kleinen Bereich um $126 \text{ GeV}/c^2$ einschränken [1].

In der vorliegenden Diplomarbeit lag der Fokus auf der Suche nach Zerfällen des hypothetischen Higgs-Bosons in zwei W -Eichbosonen, welche wiederum in zwei Lepton-Neutrino-Paare zerfallen ($H \rightarrow WW^{(*)} \rightarrow \ell\nu\ell\nu$). In diesem Zerfallskanal verhindern die nicht direkt detektierbaren Neutrinos eine vollständige Massen-Rekonstruktion. Entsprechend äußert sich das Higgs-Boson nicht wie in den oben genannten Zerfallskanälen als scharfer (wenn auch kleiner) Peak im Massenspektrum, sondern als breite Verteilung, welche von störenden Untergrundereignissen, die den Nachweis erschweren, überlagert wird. Daher ist es insbesondere in diesem Zerfallskanal eine bedeutende Aufgabe, Selektionskriterien zu bestimmen, welche es erlauben, möglichst effektiv unwesentliche Untergrundereignisse von potenziellen Signalereignissen zu trennen. Hierbei muss auf aufwendige Monte-Carlo-Simulationen der physikalischen Prozesse und der Reaktion des gesamten Detektors zurückgegriffen werden.

In dieser Diplomarbeit wurde ein Teil der Selektionskriterien der bestehenden Analyse untersucht und in Abhängigkeit der angenommenen Masse m_H optimiert, wobei nicht nur Eigenschaften des Zerfalls des Higgs-Bosons berücksichtigt wurden, sondern auch solche, welche durch dessen Produktion in Proton-Proton-Kollisionen induziert werden. So wurde z.B. speziell die Produktion des Higgs-Bosons über Fusion zweier von den Quarks in den zur Kollision gebrachten Protonen abgestrahlten Vektorbosonen (VBF) genutzt. Dieser Produktionsmechanismus hebt sich durch zusätzliche hochenergetische Bündel von Teilchen (sog. Jets) mit einer charakteristischen Topologie im Detektor von Untergrundereignissen ab. Als Maß für die Sensitivität der Analyse, welche es zu maximieren galt, wurde auf eine Näherung für die auf der Profile-Likelihood-Methode basierenden erwarteten statistischen Signifikanz einer hypothetischen Entdeckung zurückgegriffen. Aufgrund der Komplexität der hierzu verwendeten Simulation von Kollisionsereignissen ist diese Optimierung nicht analytisch durchführbar, so dass hierfür geeignete Algorithmen gesucht und implementiert werden mussten. Dabei war sicherzustellen, dass die aus der Optimierung resultierenden Selektionskriterien nicht auf unerwünschte oder unnatürliche Weise durch die Simulation beeinflusst wurden und insbesondere dass die optimierten Selektionskriterien weiterhin eine unvoreingenommene Interpretation der realen Messdaten erlaubten. Die Sensitivität auf über den VBF-Mechanismus produzierte Higgs-Bosonen konnte hierbei um ca. 10 % gesteigert werden.

Weiterhin wurde zur Durchführen der Arbeiten im Rahmen dieser Diplomarbeit ein Analyse-Software-Framework entwickelt und implementiert, welches einen effizienten Umgang mit Daten aus dem Kontext der Analyse erlaubt und nun ein Teil der offiziellen Werkzeugkette der Analyse im $H \rightarrow WW^{(*)} \rightarrow \ell\nu\ell\nu$ Kanal am ATLAS-Experiment darstellt.

[1] **ATLAS Collaboration**, G. Aad et al., “Observation of a new particle in the search for the Standard Model Higgs boson with the ATLAS detector at the LHC”, *Phys. Lett. B, Volume 716, Issue 1, 17 September 2012, Pages 1-29, ISSN 0370-2693*