

# Search for the Standard Model Higgs boson in the $H \rightarrow \tau\tau \rightarrow \ell\nu_\ell\nu_\tau h\nu_\tau$ decay mode in proton-proton collisions at $\sqrt{s} = 7$ TeV with the ATLAS experiment

Helge Hass

betreut von Prof. Dr. Karl Jakobs

---

Im Rahmen meiner Diplomarbeit arbeitete ich innerhalb der ATLAS-Kollaboration am Europäischen Kernforschungszentrum (CERN) an der Suche von fermionischen Zerfällen des Higgs-Bosons. Im Sommer 2012 wurde das Higgs-Boson mit einer Masse von ca.  $125 \text{ GeV}/c^2$  in drei bosonischen Zerfallskanälen am CERN entdeckt [1]. Die Begriffe Boson und Fermion unterscheiden hierbei Teilchen mit ganz- und halbzahligen Spin, welcher als Eigendrehimpuls der als punktförmig angenommenen Elementarteilchen aufgefasst werden kann. Im Standardmodell der Elementarteilchenphysik, welches unser bisheriges Verständnis der elementaren Teilchen und ihrer Wechselwirkungen umfasst und dessen Vorhersagen in bisherigen Experimenten mit hoher Präzision bestätigt werden konnten, ist das Higgs-Boson der letzte Bestandteil, dessen experimenteller Nachweis noch aussteht. Es wird benötigt, um den Teilchen des Standardmodells eine Masse zuzuordnen.

Am Large Hadron Collider (LHC), welcher am CERN in Genf in einer Tiefe von ca. 100 m verbaut ist, wurden im Jahr 2011 Protonen mit einer Schwerpunktsenergie von maximal 7 Teraelektronenvolt (TeV) zur Kollision gebracht. Aus einer tief inelastischen Kollisionen entsteht dabei eine hohe Anzahl an Zerfallsprodukten, welche größtenteils im ATLAS Detektor nachgewiesen werden können. Dieser ist in einer zwiebelähnlichen Struktur, aus unterschiedlichen Detektor-Komponenten mit spezifischen Aufgaben, um den Kollisionspunkt aufgebaut. Schließlich werden die in der Kollision entstandenen Teilchen mit ihren zugehörigen Impulsen und Energien mithilfe komplexer Algorithmen aus den Signalen von ca. 100 Millionen Detektor-Kanälen rekonstruiert.

Um nun ein neues Teilchen, wie das Higgs-Boson, nachzuweisen, werden die rekonstruierten Kollisionen und Prozessraten mit den Erwartungen bereits bekannter Prozesse verglichen. Die vom Standardmodell vorhergesagten Zerfälle werden dabei als Untergrund angesehen und es wird nach Überschüssen in den gemessenen Kollisionen gesucht, welche nicht durch das Standardmodell erklärt werden können.

In meiner Diplomarbeit lag der Fokus auf Zerfällen des Higgs-Bosons in zwei  $\tau$  Leptonen, welche wiederum nach sehr kurzer Zeit zum einen in ein Elektron oder Muon und zum anderen in ein Hadron<sup>1</sup> zerfallen. Die dabei entstehenden Neutrinos können im ATLAS-Detektor nicht nachgewiesen werden und erschweren die Ereignisrekonstruktion. Eine weitere Schwierigkeit beim Nachweis des gesuchten Higgs-Zerfalls ist der hohe Untergrund durch  $Z \rightarrow \tau\tau$  Zerfälle, die etwa 1000 mal öfter auftreten, diesem ähnlich sind und deren rekonstruierte Masse bei ca.  $91 \text{ GeV}/c^2$  liegt. Um das Higgs Boson dennoch nachweisen zu können, bedarf es deshalb ausgeklügelter Selektionskriterien, welche Untergrundereignisse unterdrücken und gleichzeitig viele potenzielle Signalereignisse umfassen.

---

<sup>1</sup>Als Hadronen werden stark wechselwirkende Teilchen zusammengefasst.

In meiner Diplomarbeit wurde ein maschineller Lernalgorithmus, das Entscheidungsbaumverfahren, angewandt, um diese Trennung von Signal und Untergrund zu optimieren. Hierzu durchlaufen simulierte Signal- und Untergrundereignisse aneinander gereiht Entweder/Oder Kriterien auf einzelnen Eigenschaften und landen schließlich in einem Endpunkt, der eindeutig als Signal oder Untergrund klassifiziert ist. Da man eine statistisch relevante Anzahl an Teilchen in jedem Endpunkt haben möchte, werden jedoch auch falsche Zuweisungen getroffen. Im folgenden wird nun eine Vielzahl dieser Entscheidungsbäume konstruiert, wobei von einem zum nächsten diejenigen Ereignisse, welche falsch klassifiziert wurden, ein höheres Gewicht bekommen, um fortan bessere Kriterien für sie zu finden.

Den im ATLAS-Detektor gemessenen Zerfällen konnten nun Anhand dieses trainierten Algorithmus ebenso Signalwahrscheinlichkeiten zugeordnet werden. Die so gewonnenen Verteilungen der ATLAS-Daten des Jahres 2011 wurden schließlich statistisch ausgewertet, um die Sensitivität der Analyse gegenüber eines Higgs-Boson Zerfalls zu berechnen. Dabei wurden experimentelle Unsicherheiten der Rekonstruktion und des Detektors sowie theoretische Unsicherheiten, z.B. der Prozessraten, berücksichtigt. Die in der Diplomarbeit entwickelten Algorithmen kamen dabei auf eine Sensitivität gegenüber einem Higgs-Boson mit  $2,66 \cdot \sigma_{SM}$  bei 95% Konfidenzniveau<sup>2</sup>, wohingegen vorige Analysen mit manuell optimierten Selektionskriterien bei gleichem Konfidenzniveau lediglich auf ein Higgs-Boson mit  $3,08 \cdot \sigma_{SM}$  Sensitiv waren. Die Sensitivität der Analyse gegenüber dem Higgs-Boson konnte also mithilfe der Klassifizierungsalgorithmen um rund 14 % verbessert werden. Der in der Diplomarbeit entwickelte Ansatz wurde größtenteils für die Analyse der  $H \rightarrow \tau\tau$ -Arbeitsgruppe der ATLAS-Kollaboration übernommen und auf die Daten des Jahres 2012 ausgeweitet. Schließlich wurde mit diesem Ansatz eine Abweichung von 4,1 Standardabweichungen der gemessenen Daten gegenüber der Standardmodell-Hypothese berechnet, was ein starkes Indiz für Higgs-Zerfälle in Fermionen darstellt [2].

## Literatur

- [1] The ATLAS Collaboration. A particle consistent with the higgs boson observed with the atlas detector at the large hadron collider. *Science*, 338(6114):1576–1582, 2012.
- [2] The ATLAS Collaboration. Evidence for Higgs Boson Decays to the  $\tau^+\tau^-$  Final State with the ATLAS Detector. Technical Report ATLAS-CONF-2013-108, CERN, Geneva, Nov 2013.

---

<sup>2</sup> $\sigma_{SM}$  bezeichnet den erwarteten Wirkungsquerschnitt des Higgs-Bosons im Standardmodell und mit einer Masse von 125 GeV/c<sup>2</sup>.