

**Optimierung der Eventselektion bei der
Suche nach semileptonisch zerfallenden
Z-prime-Bosonen mithilfe
von Daten des ATLAS-Experiments**

Besondere Lernleistung

zur Einbringung als fünftes Prüfungsfach
in die Abiturprüfung 2018

vorgelegt von

Tim Sebastian Hebenstreit

geboren am 20.12.1999 in Radebeul

Betreuer am Gymnasium Luisenstift Radebeul:

Herr Erik Oese

Betreuer an der Technischen Universität Dresden:

M.Sc. Franziska Iltzsche und M.Sc. Carsten Bittrich

Betreuer am CERN:

Dipl. Phys. Stefanie Todt und Dr. Arturo Rodolfo Sanchez

Fach: Physik

eingereicht am: 22.12.2017

eingereicht am 22.12.2017

1. Gutachter: Herr Erik Oese
2. Gutachter: M.Sc. Franziska Iltzsche

Inhaltsverzeichnis

1.	Einleitung	2
2.	Theoretische Grundlagen.....	3
2.1	Die Elementarteilchen – Grundbausteine der Materie	3
2.1.1	Zur Geschichte der Idee des Atoms.....	3
2.1.2	Der Aufbau des Atoms und Größenordnungen des Mikrokosmos.....	3
2.1.3	Ein Überblick über die Elementarteilchen des Standardmodells	4
2.1.4	Das CERN und sein größter Teilchenbeschleuniger: Der LHC	5
2.2	Das Z-prime-Boson als Erweiterung des Standardmodells der Teilchenphysik	7
2.2.1	Ein Überblick über die vier fundamentalen Wechselwirkungen.....	7
2.2.2	W- und Z-Bosonen als Austauschteilchen der schwachen Kraft	7
2.2.3	Das Z-prime-Boson als hypothetisches Teilchen des SSM.....	8
3.	Die Suche nach Z-prime-Bosonen mithilfe von Daten des ATLAS-Experiments.....	10
3.1	Analyse der Daten des ATLAS OpenData-Portals.....	10
3.1.1	Kurze Einführung in das ATLAS OpenData-Portal.....	10
3.1.2	Geschichte und Fakten zur Datenanalyse am CERN	11
3.1.3	Der betrachtete Zerfallskanal: $\bar{q} q \rightarrow Z' \rightarrow \bar{t} t \rightarrow W^- W^+ \bar{b} b \rightarrow \bar{l} \nu \bar{q}' q' \bar{b} b$	11
3.1.4	Aufbau eines Analyseprogramms am Beispiel des ATLAS OpenData-Portals....	13
3.1.5	Simulation von Kollisionen mithilfe der Monte-Carlo-Simulation.....	15
3.2	Experimentelle Ergebnisse der Analyse	16
3.2.1	Einführung verschiedener Massenvariablen zur Darstellung der Ergebnisse	16
3.2.2	Wahl des Selektionskriteriums für die fehlende Energie in der transversalen Ebene	18
3.2.3	Wahl des Selektionskriteriums für die Anzahl an b-jets	21
3.2.4	Wahl des Selektionskriteriums für die Masse des leptonischen W-Bosons in der transversalen Ebene	23
3.2.5	Wahl des Selektionskriteriums für die Massendifferenz des hadronisch zerfallenden W-Bosons.....	24
3.2.6	Wahl des Selektionskriteriums für den Winkel zwischen dem Top-Anti-Top-Quark-Paar in der transversalen Ebene	27
3.2.7	Zusammenfassung der Ergebnisse	29
3.2.8	Methodenreflexion.....	36
3.3	Erweiterung des ATLAS OpenData-Portals mit ROOTbooks.....	38
3.3.1	Ziele für die CERN-Projektwochen 2017	39
3.3.2	Vor- und Nachteile von ROOTbooks.....	40
3.3.3	Ergebnisse der CERN-Projektwochen 2017.....	41
4.	Danksagung	42

Anhang	43
Zur Einleitung.....	43
Zu Kapitel 2. 2. 2: Herleitung, dass $1 \frac{eV}{c^2} \approx 1,8 \cdot 10^{-36} \text{ kg}$	43
Zu Kapitel 3. 2. 1: Berechnung der verschiedenen Massenvariablen	44
Zu Kapitel 3. 2. 2: Bildschirmausschnitte, die Ergebnisse für $\frac{s}{\sqrt{B}}$ belegen.....	45
Zu Kapitel 3. 2. 7: Bildschirmausschnitt, der Ergebnis von $\frac{s}{\sqrt{B}}$ belegt	47
Glossar	48
Abbildungsverzeichnis	50
Literaturverzeichnis	52

1. Einleitung

Seit sehr langer Zeit beschäftigt sich der Mensch mit den Gesetzen und Grundsätzen unseres Universums, um zu erkennen, „was die Welt im Innersten zusammenhält“. Es sind diese fundamentalen Fragen, auf die Teilchenphysiker versuchen, eine Antwort zu finden. Die Wissenschaft der Teilchenphysik ist ein vergleichsweise junges Teilgebiet der Physik und hat bereits große Erkenntnisse hervorgebracht (vgl. KOBEL et al. 2017, S. 6). Das *Standardmodell der Teilchenphysik* (kurz *SM*) ist vermutlich die größte wissenschaftliche Errungenschaft – ein Formelkonstrukt und Modell, welches Aussagen über den Aufbau der Materie und die *Wechselwirkungen* dieser untereinander im Universum trifft. Das *SM* wurde schon oft bestätigt, aber man weiß auch, dass es nicht vollständig ist, weswegen diverse weitere Theorien *Erweiterungen des SM* sein könnten (siehe *ATLAS SummaryPlots* im Anhang).

Diese Besondere Lernleistung beschäftigt sich mit der Teilchenphysik. Schon vor zwei Jahren befasste ich mich im Rahmen einer komplexen Lernleistung mit diesem Teilgebiet der Physik. Es ging um die „Experimentelle Bestimmung der Massen von W^+ -, W^- - und Z^0 -Bosonen“. Die vorliegende Besondere Lernleistung soll thematisch auf dieser Arbeit aufbauen, weshalb es diesmal um die „Optimierung der Eventselektion bei der Suche nach semileptonisch zerfallenden Z-prime-Bosonen mithilfe von Daten des *ATLAS*-Experiments“ gehen soll. Diese Z-prime-Bosonen sind eine mögliche *Erweiterung des SM*.

Zu Beginn dieser Arbeit sollen einige theoretische Grundlagen beleuchtet werden, ohne dabei einen Anspruch auf eine vollständige Diskussion des *Standardmodells* zu erheben. Anschließend werden im experimentellen Teil Daten des OpenData-Portals des *ATLAS*-Experiments vom *CERN* ausgewertet und so Schlussfolgerungen für die Theorie des Z-prime-Bosons gezogen. Ziel ist es, bestmögliche Selektionskriterien für das Z-prime-Boson bei verschiedenen Massenhypothesen herauszufinden. Mithilfe dieser Selektionskriterien kann im Folgenden geprüft werden, ob die verfügbaren Daten ausreichen, um signifikante Aussagen über die Existenz des hypothetischen Teilchens zu treffen. Dafür wurden in der vorliegenden Arbeit Daten mit einer Schwerpunktsenergie von 8 TeV und einer integrierten Luminosität von 1 fb^{-1} analysiert. Anschließend wurde das erarbeitete Analyseprogramm während der *CERN* Projektwochen 2017 didaktisch aufgearbeitet und auf dessen Grundlage sogenannte *ROOTbooks* erstellt, um die gewonnenen Erkenntnisse der Allgemeinheit zugänglich zu machen.

Zudem können alle im Fließtext *kursiv* geschriebenen Wörter am Ende dieser Arbeit im Glossar nachgeschlagen werden.

2. Theoretische Grundlagen

2. 1 Die Elementarteilchen – Grundbausteine der Materie

2. 1. 1 Zur Geschichte der Idee des Atoms

Die Idee, dass unsere Welt aus kleinsten, unteilbaren Bausteinen besteht, ist schon sehr alt. Im antiken Griechenland äußerte der Naturphilosoph Demokrit als Erster diesen Gedanken (vgl. RÖßLER 2009, S.111). Er nannte dieses kleinste Teilchen „átomos“, was so viel bedeutet wie „unzerteilbar“. Für lange Zeit wurde diese Idee vom sogenannten Atom dann vergessen, da erst mit den wachsenden experimentellen Mitteln der Physik die Vorstellung vom Aufbau der Materie aus Atomen ausgearbeitet werden konnte. Um 1900 wiesen beispielsweise Joseph John Thomson und Ernest Rutherford nach, dass die innere Struktur der Materie aus Atomen bestehen muss. Entgegen der Annahme, das Atom sei unteilbar, konnten später Substrukturen des Atoms, wie Protonen, Neutronen und Elektronen, gefunden werden. Dadurch wirkt die ursprüngliche Bedeutung des Wortes „Atom“ leicht irreführend.

Wenn es um Atome und Elementarteilchen geht, dann handelt es sich um sehr, sehr kleine Größenordnungen. Inhalt des nächsten Kapitels ist daher ein grober Überblick über den Aufbau und die Größenordnungen des Mikrokosmos.

2. 1. 2 Der Aufbau des Atoms und Größenordnungen des Mikrokosmos

Die Elektronen befinden sich, wie man heute weiß, in der Atomhülle, welche ungefähr 99 % des Volumens des Atoms einnimmt, aber dennoch nur rund 1 % der gesamten Masse des Atoms beherbergt. Der Großteil der Atommasse befindet sich im Atomkern, welcher aus Protonen p^+ und Neutronen n^0 besteht. Auch wenn man nun denken könnte, dass diese Teilchen (p^+, n^0) endlich fundamental (im Sinne von nicht weiter teilbar) sind, ist dies immer noch nicht der Fall, denn sie sind aus sogenannten *Quarks* aufgebaut, von denen bekannt ist, dass sie kleiner als $10^{-18} m$ sind – also unvorstellbar klein. Eine Übersicht über die Strukturen und Größenordnungen in der Natur sieht man in Abb. 1.

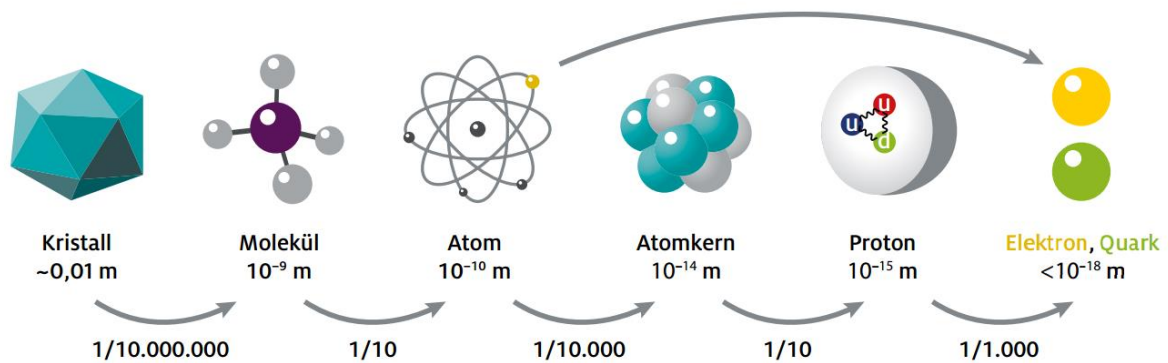


Abb. 1: Strukturen und Größenordnungen in der Natur

Die *Quarks* sind also die kleinsten Bausteine der Natur, von denen wir wissen. Deshalb bezeichnet man sie als Elementarteilchen – Teilchen, die nach heutigem Wissensstand unteilbar sind. Auch die Elektronen (die Teilchen in der Atomhülle) sind Elementarteilchen. Es wird angenommen, dass dies punktförmige Teilchen ohne räumliche Ausdehnung sind.

2. 1. 3 Ein Überblick über die Elementarteilchen des Standardmodells

Nun gibt es neben den bisher angesprochenen Elementarteilchen noch viele weitere, die es im Laufe des letzten Jahrhunderts zu kategorisieren galt. Man kann sie in der folgenden Abbildung sehen:

Drei Generationen der Materie (Fermionen)					
	I	II	III		
Masse →	2,3 MeV	1,275 GeV	173,07 GeV	0	125,9 GeV
Ladung →	$\frac{2}{3}$	$\frac{2}{3}$	$\frac{2}{3}$	0	0
Spin →	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	1	0
Name →	u up	c charm	t top	γ Photon	H Higgs Boson
Quarks	4,8 MeV $-\frac{1}{3}$ $\frac{1}{2}$ d down	95 MeV $-\frac{1}{3}$ $\frac{1}{2}$ s strange	4,18 GeV $-\frac{1}{3}$ $\frac{1}{2}$ b bottom	0 0 1 g Gluon	
	<2 eV 0 $\frac{1}{2}$ ν_e Elektron-Neutrino	<0,19 MeV 0 $\frac{1}{2}$ ν_μ Myon-Neutrino	<18,2 MeV 0 $\frac{1}{2}$ ν_τ Tau-Neutrino	91,2 GeV 0 1 Z⁰ Z Boson	
	0,511 MeV -1 $\frac{1}{2}$ e Elektron	105,7 MeV -1 $\frac{1}{2}$ μ Myon	1,777 GeV -1 $\frac{1}{2}$ τ Tau	80,4 GeV ±1 1 W[±] W Boson	Eichbosonen
Leptonen					

Abb. 2: Die Elementarteilchen des *Standardmodells*

Zuerst einmal erkennt man eine grobe Unterteilung in *Quarks*, *Leptonen* und *Eichbosonen*. Zudem sieht man rechts das sogenannte *Higgs-Boson*. Durch den Nachweis der Existenz dieses Teilchens 2012 und die folgende mediale Präsenz erlangte es einen relativ hohen Bekanntheitsgrad in der Bevölkerung. Die *Quarks* und *Leptonen* bilden zusammen die Fermionen – Teilchen mit einem halbzahligen Spin. Von ihnen gibt es jeweils drei Generationen. Die erste enthält das Up- und das Down-Quark, das Elektron-Neutrino und das Elektron. Diese vier Teilchen bilden zusammen die stabile Materie. Die zweite Generation beinhaltet das Charm- und Strange-Quark, das Myon-Neutrino und das Myon. Zuletzt machen das Top- und das Bottom-Quark, das Tau-Neutrino und das Tau die dritte Generation aus. Dabei unterscheiden sich die einzelnen Generationen lediglich in der Masse der Teilchen – je größer die Generation, desto größer die Masse der Teilchen. Zu all diesen Teilchen gibt es noch Antiteilchen mit entgegengesetzten Ladungen.

Darüber hinaus existieren auch Bosonen: Elementarteilchen mit einem ganzzahligen Spin. Man kennt von ihnen bisher die *Wechselwirkungsteilchen* – also Photon, Gluon (in acht verschiedenen Farbladungskombinationen), W^+ -, W^- - und Z^0 -Boson – und das Higgs-Boson (vgl. GRÄßLER 2014, S. 1).

2. 1. 4 Das CERN und sein größter Teilchenbeschleuniger: Der LHC

Um diese Teilchen genauer zu untersuchen, gibt es in der Schweiz und in Frankreich ein großes Forschungsinstitut für Physiker – das Conseil Européen pour la Recherche Nucléaire (dt. europäische Organisation für Kernforschung). Des Weiteren wird dort auch nach neuen Teilchen gesucht, um das *Standardmodell der Teilchenphysik* weiter zu verbessern. Finanziert wird dieses Projekt aus den Steuergeldern der Mitgliedstaaten. Deutschland finanziert beispielsweise mit rund 180 Millionen Euro pro Jahr die Forschung am *CERN* mit und ist damit größter Geldgeber (vgl. BMBF). Um der Allgemeinheit etwas zurückzugeben, hat sich das *CERN* verpflichtet, Errungenschaften kostenfrei zur Verfügung zu stellen (zum Beispiel das World Wide Web, dessen Netzwerkprotokoll HTTP dort entwickelt wurde). So ist es auch möglich, Daten der vier großen Experimente des *CERN* zu analysieren, ohne dabei Mitglied am *CERN* sein zu müssen. Im praktischen Teil dieser Besonderen Lernleistung wird mithilfe des OpenData-Portals des *ATLAS*-Experiments gearbeitet.

In Abb. 3 kann man größere Experimente am *CERN* sehen.

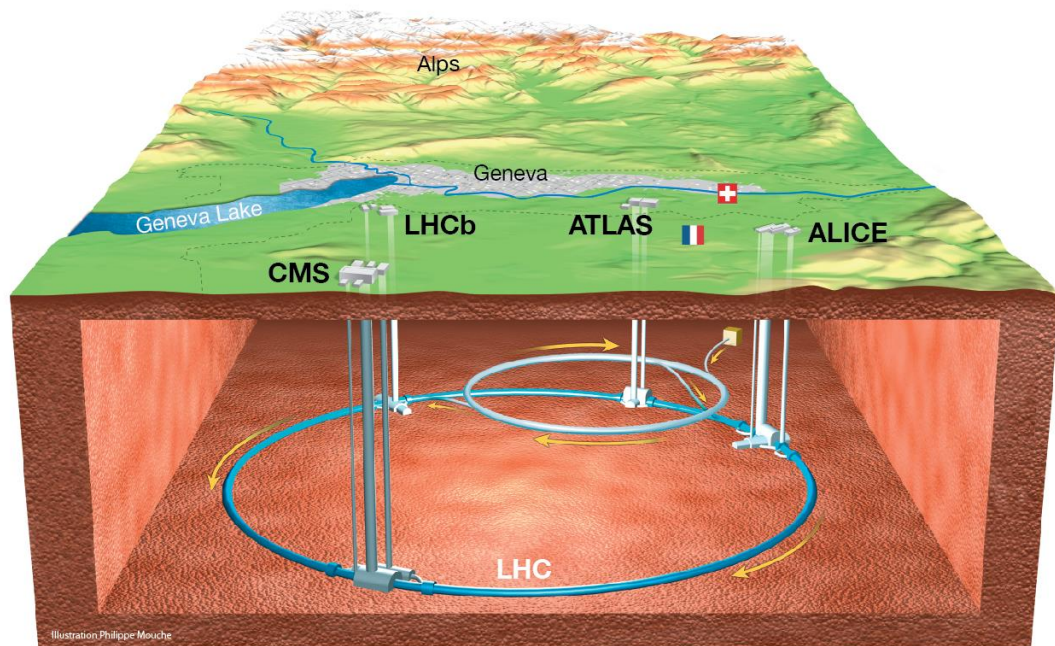


Abb. 3: Überblick über das *CERN* und den *LHC*

Das *CERN* hat seinen Hauptsitz in der Nähe von Genf und liegt noch auf schweizer Seite. Der größte Teilchenbeschleuniger des *CERN* heißt **L**arge **H**adron **C**ollider. Der 27 km lange kreisförmige Ring, liegt 100 m unter der Erde und verläuft unter Frankreich und der Schweiz. Zurzeit werden die Protonen, die im *LHC* beschleunigt werden, mit einer Schwerpunktsenergie von 13 TeV aufeinander geschossen. Der *ATLAS*-Detektor (**A** **T**orrodial **L**HC **A**pparatu**S**) liegt unterhalb des *CERN*-Geländes und ist eines der großen Experimente am *CERN*. Die anderen drei großen Experimente (CMS, LHCb, ALICE) liegen auf französischer Seite.

2. 2 Das Z-prime-Boson als Erweiterung des Standardmodells der Teilchenphysik

2. 2. 1 Ein Überblick über die vier fundamentalen Wechselwirkungen

Alle bekannten Vorgänge im Universum lassen sich auf das Wirken vier fundamentaler Kräfte zurückführen. Diese vier Grundkräfte sind die Gravitation, der Elektromagnetismus, die starke Kraft und die schwache Kraft. Bei der *Wechselwirkung* der in Kapitel 2.1.3 angesprochenen Fermionen werden *Eichbosonen* (*Austauschteilchen*) ausgetauscht. Für drei der vier Grundkräfte sind *Eichbosonen* bekannt. Die Photonen sind die *Austauschteilchen* des Elektromagnetismus, die Gluonen die der starken Kraft und die W- und Z-Bosonen sind die der schwachen Kraft. Damit ein Teilchen an der jeweiligen *Wechselwirkung* teilnehmen kann, muss es eine dementsprechende Ladung besitzen (vgl. KOBEL et al. 2017, S. 8). Für jede der fundamentalen *Wechselwirkungen* gibt es eine spezifische Ladung – die elektrische Ladung ist die Ladung des Elektromagnetismus, die *schwache Isospin-Ladung* die der schwachen Kraft und die Farbladung die Ladung der starken Kraft. Alle bisher bekannten Fermionen tragen die *schwache Isospin-Ladung* und können daher über die schwache Kraft wechselwirken. Beispielsweise besitzt das Neutrino keine elektrische und auch keine Farbladung, wodurch es nur der schwachen Kraft unterliegt und somit sehr schwierig erforscht werden kann. Zudem lassen sich die Elementarteilchen anhand ihrer verschiedenen Ladungen in ein Ordnungsschema zusammenfassen (siehe Kapitel 2.1.3). Im folgenden Kapitel wird näher auf die *Eichbosonen* der schwachen Wechselwirkung, nach denen das hypothetische Z-prime-Boson benannt ist, eingegangen.

2. 2. 2 W- und Z-Bosonen als Austauschteilchen der schwachen Kraft

Wie eingehend erwähnt, sind das W^+ -, das W^- und das Z^0 -Boson die *Austauschteilchen* der schwachen Kraft¹. Sie sind sehr massereiche Teilchen. Da Massen in der Teilchenphysik deutlich kleiner sind als in unserer makroskopischen Welt, wird hier eine andere Einheit als das Kilogramm verwendet: Beispielsweise $1 \frac{eV}{c^2}$ (sprich: ein Elektronenvolt pro Vakuumlichtgeschwindigkeit ins Quadrat). Ein $\frac{eV}{c^2}$ entspricht rund $1,8 \cdot 10^{-36} kg$ (Herleitung dieses Sachverhalts im Anhang).

Das W-Boson (positive und negative elektrische Ladung) hat eine Masse von rund $80,4 \frac{GeV}{c^2}$ und das Z-Boson eine Masse von rund $91,2 \frac{GeV}{c^2}$ (vgl. PATRIGNANI et al. 2016, S. 8 f.). Das

¹ *Wechselwirkung* bzw. *Kraft*, sowie *Austauschteilchen* bzw. *Eichboson* sind in diesem Zusammenhang äquivalent und sollen in dieser Arbeit nicht weiter differenziert betrachtet werden.

entspricht ungefähr der Masse von zwei Titanatomen ($m_{Z^0} \left(91,2 \frac{\text{GeV}}{c^2}\right) \approx 2 \cdot m_{Ti}(44,6 \frac{\text{GeV}}{c^2})$).

Wie die hochgestellte Zahl des Teilchensymbols angibt, ist die elektrische Ladung des W-Bosons entweder einfach positiv oder einfach negativ. Das Z-Boson hingegen ist elektrisch neutral. Durch die elektrische Ladung des W-Bosons kann die schwache Kraft Elementarteilchen ineinander umwandeln. Aufgrund der Ladungserhaltung muss die Summe der elektrischen Ladungen vor einer Teilchenreaktion derjenigen nach der Reaktion entsprechen. Da bei einer Reaktion mit einem W-Boson die elektrische Ladung eines anderen Teilchens geändert wird, entsteht an dieser Stelle ein Teilchen mit anderen Eigenschaften – ein weiteres Elementarteilchen. Dies geschieht beispielsweise bei der Kernfusion in der Sonne. Jedoch findet diese Umwandlung vergleichsweise selten statt, weshalb die schwache Wechselwirkung ihren Namen erhielt (vgl. KOBEL et al. 2017, S. 21). Wie auch die elektromagnetische und die starke Kraft hat die schwache Kraft eine Ladung: die *schwache Isospin-Ladung* (zu unterscheiden vom Spin in der Chemie).

2. 2. 3 Das Z-prime-Boson als hypothetisches Teilchen des SSM

Das Z-prime-Boson ist ein hypothetisches Boson, welches aus *Erweiterungen* der elektroschwachen Wechselwirkung entsteht (eine weitere mögliche Schreibweise ist *Z'-Boson*). Da das *Standardmodell*, so wie es bisher existiert, bei sehr großen Energien inkonsistent ist, stellen Physiker Theorien auf, die mögliche *Erweiterungen* des *Standardmodells* sein könnten (auch *Beyond-Standard-Model-Theorien* genannt). Anhand von Voraussagen dieser Theorien können Experimentalphysiker anschließend gezielter nach bestimmten Abweichungen von der heutigen Theorie suchen.

Eine solche *Erweiterung*, die ein Z-prime-Boson verlangt, ist beispielsweise das sogenannte Sequentielle Standardmodell (kurz SSM) (vgl. GRÄßLER 2014, S. 1). Es ist eine *Erweiterung* der elektroschwachen Wechselwirkung (Vereinigung der Theorie der schwachen Kraft und des Elektromagnetismus, siehe Abb. 4 nächste Seite). Neben dem Z-prime-Boson soll auch ein W-prime-Boson existieren. Da jedoch angenommen wird, dass die Suche nach dem Z-prime-Boson einfacher ist, konzentriert man sich auf die Suche dieses Teilchens. Je nach Theorie sind (bis auf die Masse) die Eigenschaften dieser hypothetischen Bosonen äquivalent zu denen der bereits entdeckten Bosonen. Das heißt, die Zerfallskanäle ähneln denen der bekannten W- und Z-Bosonen (vgl. GRÄßLER 2014, S. 1).

Dennoch würde eine Eigenschaft des Z-prime-Bosons deutlich von der des Z^0 -Bosons abweichen – die Masse. Da es jedoch auch Theorien gibt, die ein masseloses Z-prime-Boson vorhersagen, kann man nicht schlussfolgern, welche Reichweite das Z-prime-Boson haben

müsste (vgl. LANGACKER 2009, S. 14). Ein massebehaftetes Z-prime-Boson müsste eine endliche Reichweite haben, ein masseloses dagegen eine unendliche.

Das resultiert aus dieser quantenmechanisch herleitbaren Gleichung (mittels der Heisenberg'schen Unschärferelation):

$$\lambda = \frac{\hbar \cdot c}{m \cdot c^2}$$

Dabei ist λ die Reichweite eines bestimmten Teilchens, $\hbar$ das reduzierte Planck'sche Wirkungsquantum und c die Lichtgeschwindigkeit. Je größer die Masse eines Teilchens ist, desto kleiner ist dessen Reichweite (indirekte Proportionalität). Ist die Masse eines Teilchens jedoch gleich null, so besitzt es eine Reichweite von $\lambda = \infty$ (vgl. KOBEL et al. 2017, S. 42).

In Abb. 4 sieht man den heutigen Stand der Elementarteilchenphysik (bis zur gestrichelten Linie) und das zukünftige Ziel: die Große vereinheitlichte Theorie (kurz: GUT für „Grand Unified Theory“).

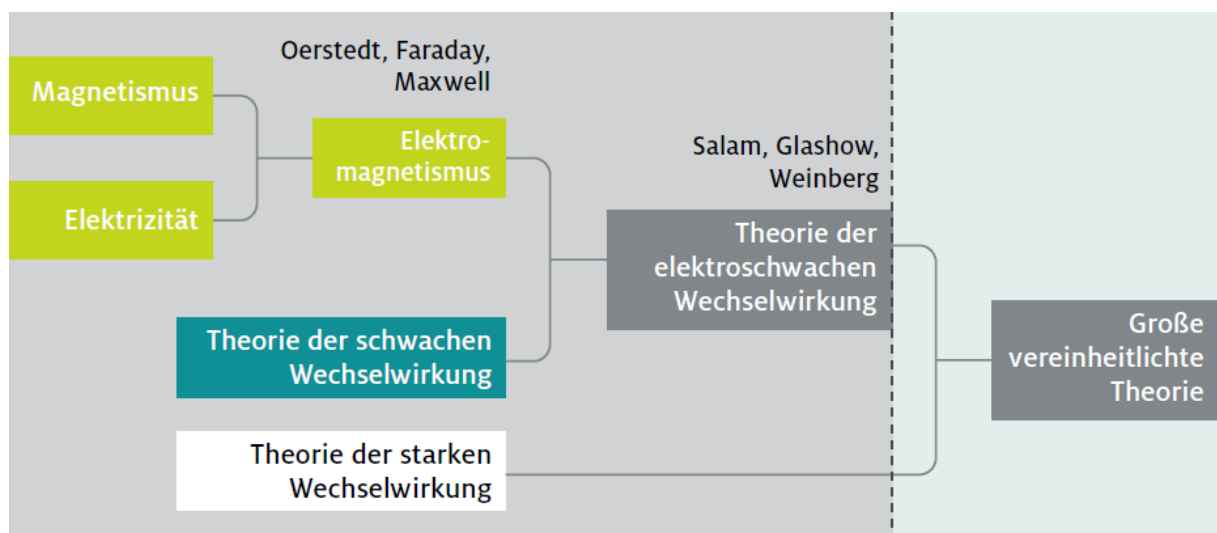


Abb. 4: Der Weg zur GUT

Auf dem Weg zur GUT ist es möglich, dass W-prime- und Z-prime-Bosonen entdeckt werden können. Würde es gelingen, diese hypothetischen Teilchen nachzuweisen, wäre dies ein weiterer Meilenstein in der Geschichte der Physik. Schon 1979 gab es für Abdus Salam, Sheldon Glashow und Steven Weinberg für die Erkenntnis, dass der Elektromagnetismus und die schwache Wechselwirkung sich zur elektroschwachen Wechselwirkung vereinigen lassen, den Nobelpreis in Physik (vgl. LEMMER 2014, S. 141). Ziel der Physik ist es, Kräfte zu vereinheitlichen, um so letztendlich auf eine alles beschreibende Theorie zu gelangen. Die Idee hinter W- und Z-prime ist jedoch eine andere: Man führt eine neue *Kraft* bzw. *Wechselwirkung* ein, die ähnlich zur elektroschwachen ist. Die Folge dessen wäre das Vorhandensein neuer Teilchen – der sogenannten W- und Z-prime-Bosonen.

3. Die Suche nach Z-prime-Bosonen mithilfe von Daten des ATLAS-Experiments

3. 1 Analyse der Daten des ATLAS OpenData-Portals

3. 1. 1 Kurze Einführung in das ATLAS OpenData-Portal

Das *CERN* hat vier große Experimente am *LHC*. Jedes davon stellt Daten bereit, die Interessierte mit einfachen technischen Mitteln analysieren und so selbst zum Teilchenphysiker werden kann. Um auf die Daten des *ATLAS*-Experiments Zugriff zu bekommen, lädt man sich im Internet unter *opendata.atlas.cern* eine sogenannte *virtuelle Maschine (VM)* mit allen notwendigen Programmen herunter. Eine *virtuelle Maschine* beinhaltet ein Betriebssystem, welches vom Virtualisierungsprogramm auf dem eigentlichen Betriebssystem des Computers simuliert wird. Auf der oben genannten Internetadresse lassen sich verschiedene *VMs* herunterladen. Je nach Größe des Datensatzes, den man analysieren möchte, kann man sich dort die entsprechende *VM* herausuchen. Um die *VM* nun zu starten, nutzt man beispielsweise die VirtualBox von Oracle. Sie ist ausführbar auf allen gängigen Betriebssystemen, sodass auch die Datenanalyse mit fast jedem Computer funktioniert. Für diese Besondere Lernleistung wurde die *VM* mit VirtualBox auf Windows 7 ausgeführt¹. Nach dem Start der Maschine, welche auf einem Linux *ubuntu 14.04* beruht, öffnen sich alle benötigten Programme automatisch. Im *ATLAS OpenData-Portal* gibt es diverse vorprogrammierte Analyseprogramme, unter anderem auch ein vorgeschriebenes Musteranalyseprogramm des Z-prime-Bosons. Eine erste Analyse lässt sich zum Test der *VM* über folgendes Kommando direkt in der Konsole starten:

```
python Runscript.py -a ZPrimeAnalysis.py -s "WW, WZ"
```

Hierbei wird eine Z-prime-Boson-Analyse mit den Datensätzen *WW* und *WZ* ausgeführt. Anschließend muss man sich, um die Ergebnisse dieser Analyse zu erhalten, die Diagramme plotten lassen. Dies geschieht über diese Anweisung:

```
python PlotResults.py Configurations/PlotConf/_  
ZPrimeAnalysis.py
```

Die Ergebnisse in Form von Diagrammen findet man nun im Ordner *Output*. Alle zu speichernden Diagramme wurden zuvor in der Datei *StandardHistograms.py* im Ordner *Analysis* definiert. Möchte man also neue Diagramme erzeugen, so kann man diese dort implementieren und muss sie anschließend nur noch im Analysecode verankern, damit sie auch

¹ Durch die laufende Aktualisierung des *ATLAS OpenData-Portals* ist es möglich, dass hier eine inzwischen ältere Version der *VM* genutzt wurde. Die beschriebenen Abläufe können daher leicht variieren im Gegensatz zu neueren Versionen.

gefüllt werden.

Ein Ziel der vorliegenden Arbeit war es, die Suche durch sogenannte *Cuts* zu verbessern, um Signal- von Untergrundereignissen zu trennen. *Cuts* sind Selektionskriterien, die auf eine bestimmte Analyse angewendet werden. Dabei wurde wie folgt vorgegangen: Zuerst wurde die vorinstallierte Analyse des Z-prime-Bosons durchgeführt. Danach wurden die einzelnen *Eventcuts* Schritt für Schritt verbessert, um so das bestmögliche Ergebnis zu erreichen. Ziel dabei war es, die Daten von Interesse (sog. Signal) – in diesem Fall mögliche Z-prime-Boson-Zerfälle – vom Untergrund zu trennen.

3. 1. 2 Geschichte und Fakten zur Datenanalyse am CERN

Noch vor rund 50 Jahren wurden Daten am *CERN* per Hand ausgewertet. Heute übernimmt das moderne Computertechnik, deren Programme von den Physikern am *CERN* und den vielen Kollaborationen weltweit geschrieben werden. Die dabei am häufigsten verwendeten Programmiersprachen sind *Python* und *C++*. Im *ATLAS* OpenData-Portal wird *Python* genutzt. Die schrittweise Anpassung und Verbesserung des Analysecodes wird in Kapitel 3.2 beschrieben. Zunächst soll es um den betrachteten Zerfallskanal gehen, um die darauffolgende Ausführung im Programm nachvollziehen zu können.

3. 1. 3 Der betrachtete Zerfallskanal: $\bar{q} q \rightarrow Z' \rightarrow \bar{t} t \rightarrow W^- W^+ \bar{b} b \rightarrow \bar{l} \nu \bar{q}' q' \bar{b} b$

In dieser Besonderen Lernleistung wird bei der Analyse des Z-prime-Bosons ein bestimmter Zerfallskanal betrachtet. In Abb. 5 ist dieser in Form eines Feynman-Diagramms zu sehen.

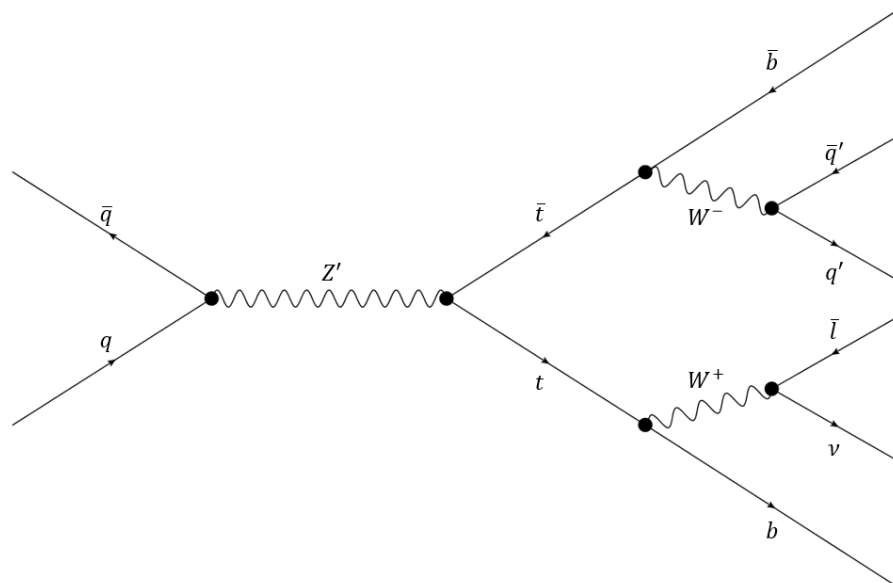


Abb. 5: $\bar{q} q \rightarrow Z' \rightarrow \bar{t} t \rightarrow W^- W^+ \bar{b} b \rightarrow \bar{l} \nu \bar{q}' q' \bar{b} b$

Feynman-Diagramme werden in der Teilchenphysik dazu genutzt Teilchenreaktionen darzustellen. Dabei werden sie von links nach rechts gelesen. In einer einfachen Interpretation

von Feynman-Diagrammen liegt in der linken unteren Ecke ein imaginärer Koordinatenursprung. Die gedachte Abszissenachse ist die Achse für die Zeit und die gedachte Ordinatenachse die des Ortes¹. In der gezeigten Abbildung erkennt man, dass bei einer Proton-Proton-Kollision ein Z-prime-Boson entsteht, welches in ein Top-Quark-Anti-Top-Quark-Paar zerfällt. Protonen bestehen unter anderem aus *Quarks*, weswegen das Z-prime-Boson hier beispielsweise aus einem Quark-Anti-Quark-Paar erzeugt wird. Da das erzeugte Top-Quark und Anti-Top-Quark wiederum instabil sind, zerfallen sie unter Abstrahlung eines W-Bosons in ein Bottom- bzw. in ein Anti-Bottom-Quark. Eines der beiden W-Bosonen zerfällt nun leptonisch in ein elektrisch geladenes *Lepton* (also Elektron, Myon oder Tau) und das dazugehörige Neutrino. Das andere W-Boson zerfällt hadronisch in zwei *Quarks*. Ein solcher Z-prime-Boson-Zerfall nennt sich semileptonisch (da die Hälfte leptonisch zerfällt). Aufgrund des *Confinements* kommen die entstandenen *Quarks* nicht isoliert vor (vgl. KOBEL et al. 2017, S. 20). So bilden sich aus den entstandenen *Quarks* und weiteren *Quarks* aus hochenergetischen Paarierungsprozessen Hadronenhaufen, die wieder farbneutral sind und als sogenannte Jets im Detektor gemessen werden. Da bei diesem Zerfall vier *Quarks* entstehen, würde man vier Jets im Detektor sehen. Zudem entsteht bei dem leptonischen W-Boson-Zerfall ein Neutrino (eines der beiden *Leptonen*), welches im Detektor nicht gesehen werden kann, da es nur über die schwache Wechselwirkung – und daher sehr selten – wechselwirkt. Jedoch kann man mithilfe des Impulserhaltungssatzes den Neutrinoimpuls senkrecht zur Protonenbahn bzw. senkrecht zur Strahlachse rekonstruieren. Da vor der Kollision der Gesamtimpuls der *Quarks* (Bestandteile des Protons) in der transversalen Ebene gleich null war, muss er das auch nach der Kollision sein. „Fehlt“ nun nach einer Kollision Impuls in der transversalen Ebene, so wird die mit dem Impuls verbundene Energie dem Neutrino zugeschrieben. Sie nennt sich *missing energy in transverse plane (MET)*. Auch wenn das Neutrino nicht direkt gemessen werden kann, wird ihm der „fehlende Impuls“ und somit auch die dazu gehörende "fehlende Energie" zugeschrieben. Dies bezieht sich demnach lediglich auf die Messung im Detektor. Sollten bei einer Kollision sogar zwei Neutrinos entstehen, kann man diese beiden nicht voneinander trennen.

Es wird also bei der Suche nach Z-prime-Bosonen nach vier Jets, einem *Lepton* und fehlender Energie in der transversalen Ebene gesucht. Auch wenn in der Abb. 5 oben zu sehen ist, dass zwei *Leptonen* entstehen, wird nur nach einem gesucht, da das entstehende Neutrino ein *Lepton* ist und für den Detektor daher nicht sichtbar. Es sollte möglichst viel transversale Energie

¹ Wäre dies tatsächlich so, könnte man anhand des Anstiegs die Geschwindigkeit berechnen und wüsste gleichzeitig den Ort eines Teilchens – das ist jedoch ein Verstoß gegen die Heisenberg'sche Unschärferelation, weswegen dies hier nur eine Veranschaulichung ist.

fehlen, da das Neutrino aus dem Zerfall eines massiven Z -prime-Boson stammen soll. Wie hoch die MET -Schwelle gesetzt wird, gilt es noch herauszufinden (siehe Kapitel 3.2.2). Zudem sollten zwei der gesuchten Jets sogenannte b -Jets sein (Jets, die aus dem Zerfall eines Bottom-Quarks entstanden sind). Die besondere Eigenschaft dieser Jets ist, dass Hadronen die ein Bottom-Quark beinhalten eine etwas längere Lebensdauer haben und sich somit noch einige Millimeter von dem Kollisionspunkt (Vertex) entfernen, bevor sie dann zerfallen. Dieser zweite Zerfallsvertex kann ebenfalls rekonstruiert werden, weswegen sie von anderen Jets unterschieden werden können und daher ein weiterer wichtiger Anhaltspunkt in der Analyse sind.

Als Nächstes soll auf den Aufbau eines Analyseprogramms eingegangen werden, um das generelle Vorgehen nachvollziehen zu können.

3. 1. 4 Aufbau eines Analyseprogramms am Beispiel des ATLAS OpenData-Portals

Ein Programm zur Analyse von Teilchenkollisionen setzt sich meist aus mehreren Unterprogrammen zusammen. Der grobe Aufbau soll hier am Beispiel der VM des OpenData-Portals von *ATLAS* erklärt werden. In der folgenden Abb. 6 kann man die Ordnerstruktur des gesamten Analyseprogramms erkennen. Zudem sind jeweils zwei Beispieldinhalte mit angegeben.

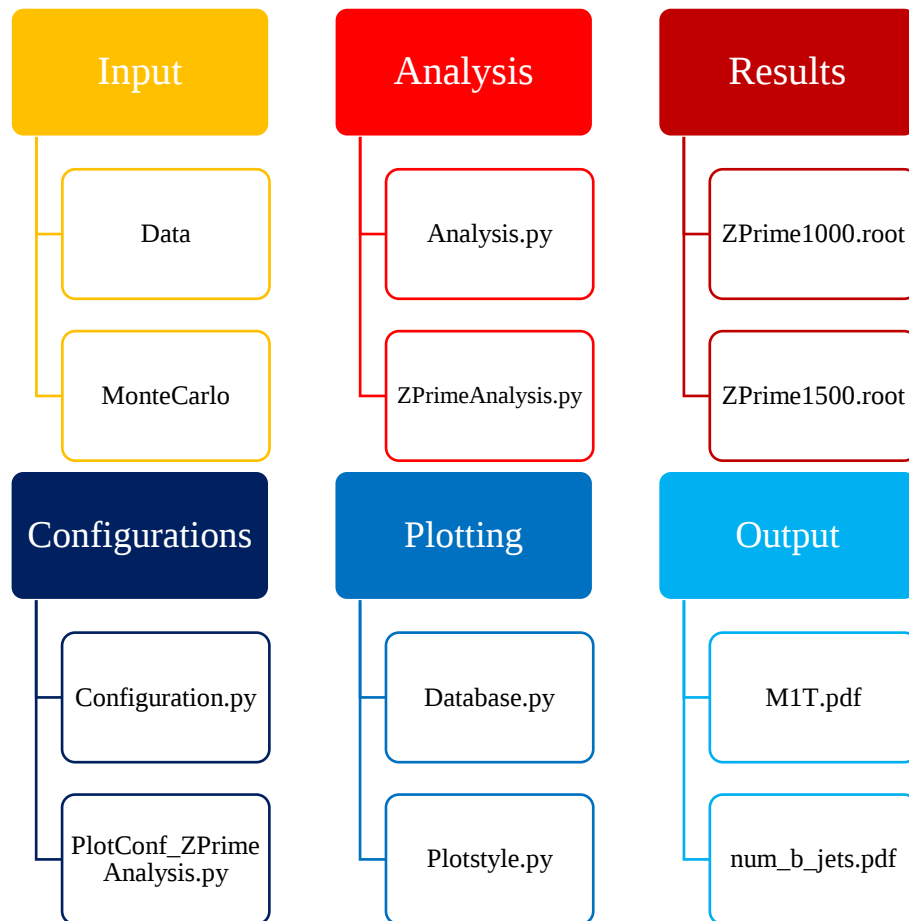


Abb. 6: Ordnerstruktur des gesamten Analyseprogramms der VM des ATLAS OpenData-Portals

Für eine Analyse benötigt man zuerst den sogenannten Input. Dieser besteht einerseits aus real aufgenommenen Daten vom ATLAS-Detektor und andererseits aus Daten, die mit Monte-Carlo-Simulationen erstellt wurden. Auf die mit Monte-Carlo-Simulation erzeugten Daten wird noch einmal näher im Kapitel 3.1.5 eingegangen. Anschließend sind Analyseprogramme dafür zuständig, Signal von Untergrund zu trennen. Zuletzt gibt es weitere Programme, die den Output (bzw. die Ergebnisse) der Analyseprogramme einlesen und daraus Diagramme (auch Plots genannt) erstellen.

Die auszuwertenden Daten befinden sich im ATLAS OpenData-Portal im Ordner `Input`. Im Ordner `Analysis` befinden sich die *Python*-Skripte, in denen die eigentlichen Selektionskriterien auf die Daten angewendet werden. Die Ergebnisse einer durchgeführten Analyse werden im Ordner `Results` in sogenannten *ROOT*-Dateien gespeichert. Anschließend lassen sich im Ordner `Configurations` die später entstehenden Diagramme anpassen. Allgemeine Anpassungen können in Dateien des Ordners `Plotting` vorgenommen werden. Die letztendlich erzeugten Diagramme werden im Ordner `Output` ausgegeben.

Um all diese beschriebenen Schritte durchzuführen, gibt es auf derselben Ebene zu den oben genannten Ordnern *Python*-Skripte, die in der Konsole der Virtuellen Maschine ausgeführt

werden können. Zuerst führt man mit folgendem Befehl die Analyse durch:

```
python RunScript.py
```

Anschließend führt man das *Python*-Skript zum Erstellen der Diagramme wie folgt aus:

```
python PlotResults.py Configurations/PlotConf/_  
ZPrimeAnalysis.py
```

Die erzeugten Diagramme werden dann wie angesprochen im Ordner `Output` gespeichert.

3. 1. 5 Simulation von Kollisionen mithilfe der Monte-Carlo-Simulation

Monte-Carlo-Simulationen werden am *CERN* genutzt, um mögliche *Erweiterungen* des *Standardmodells* zu testen, aber auch um kontinuierlich zu überprüfen, ob das *Standardmodell* – so wie es heute existiert – korrekt ist. Dabei simuliert man auf Grundlage der Gleichungen des *Standardmodells* beziehungsweise seiner *Erweiterungen* den physikalischen Vorgang einer Teilchenkollision in einem Detektor und die darauffolgende Detektion. Zuerst werden hierbei die kollidierenden Protonen simuliert. Die einzelnen Bestandteile bekommen nach so genannten *Partondichtefunktionen* (eng.: *parton density functions*) Energien zugeordnet. Diese Funktionen geben Wahrscheinlichkeiten an, wie viel Energie einzelne Bestandteile des Protons am Gesamtimpuls desselben entlang der Strahlachse besitzen. Nun sagt das *Standardmodell* Reaktionswahrscheinlichkeiten für verschiedene Prozesse vorher. Ein Maß für diese Wahrscheinlichkeit nennt sich Wirkungsquerschnitt und hat die Einheit *Barn*. Ein Barn entspricht 10^{-24} cm^2 (vgl. LEMMER 2014, S. 112).

Des Weiteren wird die instantane Luminosität genutzt. Sie gibt an, wie oft die Möglichkeit für eine Reaktion innerhalb einer Sekunde gegeben ist. Die Einheit für diese physikalische Größe ist das inverse Barn dividiert durch die Zeit ($[L] = 1 \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$). Die Anzahl der Kollisionen pro Fläche und Zeit entspricht also der instantanen Luminosität. Integriert man diese Größe nach der Zeit erhält man die Luminosität. Sie ist unter anderem eine wichtige Kennzahl für Teilchenbeschleuniger, da sie deren Leistungsfähigkeit beschreibt (vgl. ebd., S. 113 f.).

Weiterhin werden Interaktionswahrscheinlichkeiten der entstandenen Teilchen mit dem Detektor berechnet. Nun simuliert Computertechnik diesen komplexen Vorgang, sodass man Ereignisse erhält, die denen im *LHC* ähnlich sind – mit dem Unterschied zu den experimentell gemessenen Daten, dass man hier weiß, was geschehen ist.

3. 2 Experimentelle Ergebnisse der Analyse

Im Folgenden sollen die Selektionskriterien für den in Kapitel 3.1.3 beschriebenen Zerfallskanal des Z-prime-Bosons genannt und erklärt werden. Dabei werden die bei der Analyse erstellten Diagramme mit eingebunden und erläutert.

In der vorinstallierten Analyse der Z-prime-Bosonen im OpenData-Portal sind folgende Selektionskriterien bereits mit integriert:

- Standard Selektionskriterium (eng.: StandardEventCut) → Dieses Selektionskriterium stellt beispielsweise sicher, dass ein Zerfallsprodukt einen eindeutigen Vertex besitzt, damit man ausschließlich gute Messdaten nutzt.
- Selektionskriterium für die Anzahl an Leptonen: $n_{leptons} = 1$
- Selektionskriterium für die fehlende Energie in der transversalen Ebene: $MET > 30 \text{ GeV}$
- Selektionskriterium für die Anzahl an Jets: $n_{jets} \geq 4$
- Selektionskriterium für die Anzahl an b -jets: $n_{b-jets} \geq 1$
- Selektionskriterium für die Masse des leptonischen W-Bosons in der transversalen Ebene: $m_{W-Boson}^T \geq 30 \text{ GeV}$ und $m_{W-Boson}^T + MET \geq 60 \text{ GeV}$

Diese hier aufgelisteten Selektionskriterien werden alle weitergenutzt, aber – soweit notwendig – verbessert und angepasst. Dies wird im Folgenden genau beschrieben. Zuvor werden jedoch noch verschiedene Massenvariablen eingeführt, um später die Ergebnisse exakt darzustellen.

3. 2. 1 Einführung verschiedener Massenvariablen zur Darstellung der Ergebnisse

Ein Ziel in der Teilchenphysik ist es, den Zerfall eines möglichen Z-prime-Bosons zu rekonstruieren und abschließend die Masse des Z-prime-Bosons zu bestimmen. In dieser Arbeit sollen dazu verschiedene Massenhypothesen für das Z-prime-Boson analysiert werden. Dabei sollen möglichst alle beteiligten Zerfallsprodukte berücksichtigt werden. Wegen der angesprochen Problematik bezüglich des Neutrinos gestaltet sich dies komplexer. Das Neutrino trägt wie erwähnt auch einen beachtlichen Teil an Energie aus dem Zerfall, weshalb sich die Masse des Z-prime-Bosons nicht direkt bestimmen lässt. Damit man diese Masse bestmöglich bestimmen kann, werden in der vorliegenden Arbeit verschiedene Massenvariablen in Bezug auf die invariante Masse betrachtet, die im Weiteren nun kurz vorgestellt werden sollen. Die invariante Masse in der Teilchenphysik entspricht der Gesamtenergie aller am Zerfall beteiligten Teilchen und damit der zwar hier nicht direkt bestimmbar, aber angestrebten Masse.

Bei der Berechnung der invarianten Masse wird die Summe der sogenannten Vierervektoren der Zerfallsprodukte des schweren Teilchens, dessen Masse man ermitteln möchte, bestimmt.

$$P^\mu P_\mu = \sum_{i=1}^n P_i^\mu P_{\mu i}$$

Diese Vierervektoren werden auch Lorentzvektoren genannt und setzen sich aus der Energie und den drei Raumimpulsen eines Teilchens zusammen:

$$P^\mu = \begin{pmatrix} E \\ p_x \\ p_y \\ p_z \end{pmatrix}$$

Da also die Berechnung der invarianten Masse nicht möglich ist, sind andere Berechnungsmethoden notwendig. Dazu werden beispielsweise die sogenannte sichtbare Masse, die absolute Transversalmasse und die Transversalmasse mit Schrankencharakter verwendet.

Die genaue Berechnung der hier vorgestellten Massenvariablen ist im Anhang zu finden.

Die sichtbare Masse

Hierbei wird das bei dem Zerfall entstandene Neutrino komplett vernachlässigt und es wird nur die invariante Masse der anderen rekonstruierten Teilchen betrachtet – exklusive des Neutrinos (vgl. GRÄßLER 2014, S. 7 und TODT 2015, S.55).

Die absolute Transversalmasse

Da die Informationen über Longitudinalimpulse bei dem Zerfall des Z-prime-Bosons unvollständig sind, werden alle Impulse der am Zerfall beteiligten Teilchen in die transversale Ebene, d.h. senkrecht zum Strahl, projiziert (vgl. GRÄßLER 2014, S. 6). Jedoch gibt es für die Projizierung der Energie in die transversale Ebene mehrere Möglichkeiten, weswegen es unterschiedliche Transversalmassen gibt.

Die Transversalmasse mit Schrankencharakter

Die Transversalmasse mit Schrankencharakter ist für den in dieser Arbeit angesprochenen Zerfall die wahrscheinlich beste Rekonstruktion der Z-prime-Boson-Masse, da alle bekannten Werte der Zerfallsprodukte mit in die Berechnung einfließen.

Die Transversalmasse mit Schrankencharakter ist durch Festlegung der Art der transversalen Projektion und durch die Festlegung der Reihenfolge der Berechnungsoperationen eine

bestimmte Transversalmasse. Genauer wird dieser Sachverhalt beispielsweise von Todt dargestellt (vgl. TODT 2015, S.50).

3. 2. 2 Wahl des Selektionskriteriums für die fehlende Energie in der transversalen Ebene

Da bei dem beschriebenen Zerfall des Z-prime-Bosons definitiv ein Neutrino entsteht, welches nicht detektiert werden kann (wie in Kapitel 3.1.3 beschrieben), wird nach einem Zerfall gesucht, bei dem im Detektor eine hohe fehlende Energie in der transversalen Ebene gemessen wurde. Eine Programmzeile, die dieses Selektionskriterium auf die Daten anwendet, sieht beispielsweise so aus:

```
if not etmiss.et() > 30: return False
```

Diese Programmzeile bedeutet, dass die *MET*-Schwelle bei 30 GeV gesetzt wurde. Ein entsprechendes Diagramm sieht man in Abb. 7.

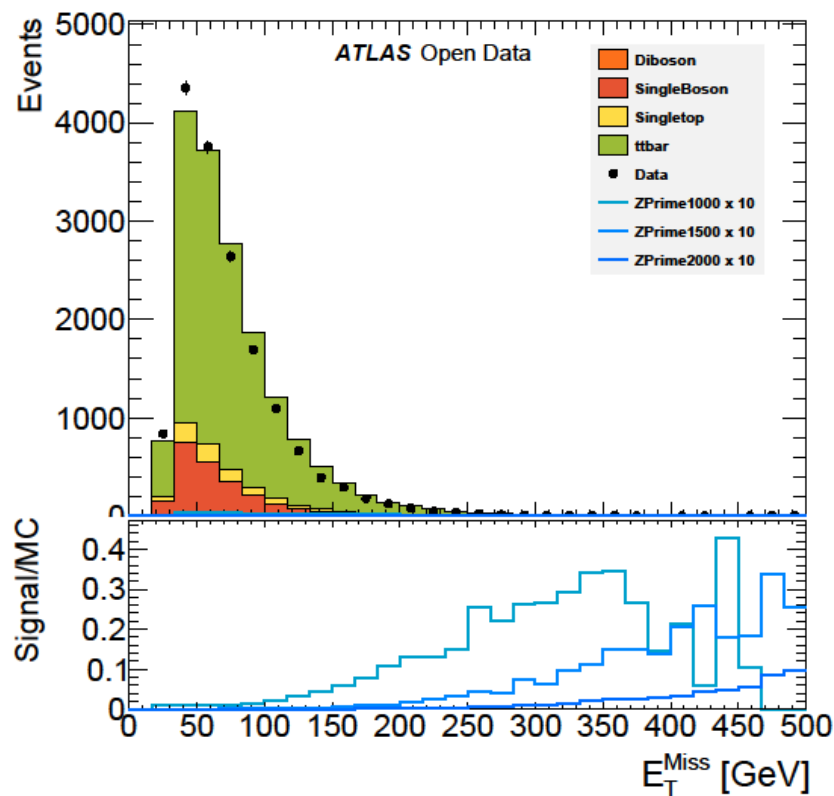


Abb. 7: Im oberen Diagramm: Verteilung der fehlenden Energie in der transversalen Ebene ($MET > 30 \text{ GeV}$) und im unteren Diagramm: Quotient aus Signalerwartung des Z-prime-Bosons für verschiedene Massenhypothesen und SM-Untergrund

An dieser Stelle der Arbeit soll die Art der Darstellung von Diagrammen, wie sie oben in Abb. 7 geschieht, erklärt werden. Zuerst ist erkennbar, dass die Darstellung zweigeteilt ist. In beiden

Diagrammen befindet sich an der Abszissenachse die jeweilige Messgröße, die untersucht werden soll – in diesem Fall die fehlende Energie in der transversalen Ebene. Im oberen Diagramm wird an der Ordinatenachse die Anzahl an Ereignissen, die die jeweilige Abfrage erfüllen, abgetragen (bzw. die Erwartung, wie viele Ereignisse die Abfrage erfüllen im Falle der Monte-Carlo-Daten). Dabei erkennt man auch unterschiedlich gefärbte blaue Linien, die die simulierte Signalerwartung für verschiedene Z-prime-Boson-Massenhypothesen darstellen. Dabei ist die simulierte Signalerwartung die Hypothese des Sequentiellen Standardmodells (vgl. Kapitel 2.2.3). Um diesen Sachverhalt im gleichen Diagramm zeigen zu können, sind die Linien jedoch zehnfach überhöht dargestellt (siehe Legende oben rechts im Diagramm). Im unteren Diagramm befindet sich an der Ordinatenachse der Quotient aus simulierter Z-prime-Boson-Signalerwartung (blaue Linien im oberen Diagramm) und der simulierten SM-Untergrunderwartung (durch Monte-Carlo-Simulation erzeugte Ereignisse). Es wird also gezeigt, wie viele Signalereignisse man relativ zur SM-Vorhersage erwarten würde. Im oberen Diagramm erkennt man des Weiteren bunt gefärbte Flächen, die für bestimmte Prozesse stehen (siehe Legende oben rechts im Diagramm). Dabei wird zwischen vier verschiedenen Prozessen unterschieden:

- Erzeugung zweier Bosonen (**Diboson** → orange)
- Erzeugung eines Bosons (**SingleBoson** → rot)
- Erzeugung eines Top-Quarks (**Singletop** → gelb)
- Erzeugung zweier Top-Quarks (**ttbar** → grün)

Für eine ausführliche Analyse müsste an dieser Stelle genauer auf die Untergrundprozesse – wie beispielsweise die oben genannten – eingegangen werden, dies soll jedoch hier nicht geleistet werden.

Diese Daten wurden mittels Monte-Carlo-Simulation (MC) erzeugt, weswegen bekannt ist, was geschah. Die schwarzen Datenpunkte, die man im oberen Diagramm sieht, sind die Analyseergebnisse der realen Detektordaten. Da der Monte-Carlo-Simulation das *Standardmodell* zugrunde liegt, erwartet man vorerst keine signifikante Abweichung der im Detektor aufgenommenen Daten und der Theorie (MC) voneinander. Geringe Abweichungen können durch statistische Fluktuationen entstehen. Sollte die Abweichung jedoch auch nach längerer Analyse mit mehr Daten nicht verschwinden, besteht die Möglichkeit, einen durch das *Standardmodell* bisher unerklärten Prozess gefunden zu haben (wie es beim Nachweis der Existenz des Higgs-Bosons 2012 der Fall war).

Wenn also ein Z-prime-Boson existieren würde, so würde man erwarten, dass die schwarzen Datenpunkte über den bunten Flächen im oberen Diagramm liegen. Dies würde weiterhin

bedeuten, dass mehr Ereignisse gemessen wurden, als vom Standardmodell vorhergesagt werden. Je nach *Erweiterung des SM* bzw. *BSM-Theorie* würde man unterschiedlich viele zusätzliche Ereignisse an unterschiedlichen Stellen erwarten – dies zeigen die blauen Linien im oberen Diagramm.

Nachdem ein Selektionskriterium auf die Daten angewendet wurde, wird die Qualität dieses Selektionskriteriums mithilfe eines weiteren Programms gemessen. Es nennt sich `StatResult.py` und berechnet verschiedene Definitionen der Signifikanz der Ergebnisse.

In der hier vorliegenden Arbeit wird das Ergebnis aus $\frac{S}{\sqrt{B}}$ als Maß für die Qualität des Selektionskriteriums genutzt. Dabei steht S für das Signal, also die Anzahl der Ereignisse, die als mögliche Z-prime-Boson-Ereignisse zählen, und B steht hierbei für den Background, also den Untergrund (entspricht den bunt gekennzeichneten Flächen im Diagramm). Dieser Untergrund entspricht der Anzahl der Ereignisse, die vom *Standardmodell* von der Topologie her genauso vorhergesagt werden, wie der oben gezeigte Zerfall eines Z-prime-Bosons, welcher aber selber nicht vom *SM* vorhergesagt wird. Solche Ereignisse passieren die Ereignisselektion ebenfalls und können von der verwendeten Analyse also nicht unterschieden werden. Zudem sind die Werte der Signifikanz in der vorliegenden Arbeit zehnfach größer, als dies tatsächlich der Fall ist, da mit dem ebenfalls zehnfach überhöhten Signal gerechnet wird. Dies ist jedoch hier kein Problem, da es lediglich um den Vergleich der Werte geht.

Auf die Mathematik und die daraus resultierenden Gründe für die Auswahl dieser Definition der Signifikanz soll an dieser Stelle nicht weiter eingegangen werden. Bei vielen Analysen hat sich herausgestellt, dass der Quotient aus Signal und Wurzel des Untergrunds sinnvoll ist, um die Qualität des Selektionskriteriums zu messen (vgl. PUNZI 2003, S.4).

Um die Selektionsschwelle für den *MET* zu bestimmen, wurden bei verschiedenen Werten des *MET* die Daten analysiert und anschließend das Programm `StatResult.py` ausgeführt. Dabei ergaben sich folgende Ergebnisse bei der Annahme, dass die Masse des Z-prime-Bosons 1000 *GeV* beträgt:

- *MET*-Schwelle bei 30 *GeV*: $\frac{S}{\sqrt{B}} = 0,2578 \sigma$
- *MET*-Schwelle bei 140 *GeV*: $\frac{S}{\sqrt{B}} = 0,3528 \sigma$
- *MET*-Schwelle bei 150 *GeV*: $\frac{S}{\sqrt{B}} = 0,3549 \sigma$
- *MET*-Schwelle bei 160 *GeV*: $\frac{S}{\sqrt{B}} = 0,3536 \sigma$

Es lässt sich erkennen, dass das Qualitätsmaß $\frac{S}{\sqrt{B}}$ bei einem MET von 150 GeV am größten ist, weswegen das Selektionskriterium für die fehlende Energie in der transversalen Ebene bei 150 GeV gesetzt wird (Bildschirm Ausschnitte, die diese Zahlen belegen befinden sich im Anhang). Zudem ist auch erkennbar, dass der Wert von $\frac{S}{\sqrt{B}}$ im Vergleich zu den Standard-Selektionskriterien deutlich gestiegen ist (um mehr als 35 %).

Das MET -Diagramm nach der Anwendung dieses Selektionskriteriums ist in Abb. 8 gezeigt. Es ist jetzt auch im oberen Diagramm im Gegensatz zu Abb. 7 ein Z-prime-Boson-Signal zu sehen (blaue Linie), was auf eine erste Optimierung der Analyse hinweist.

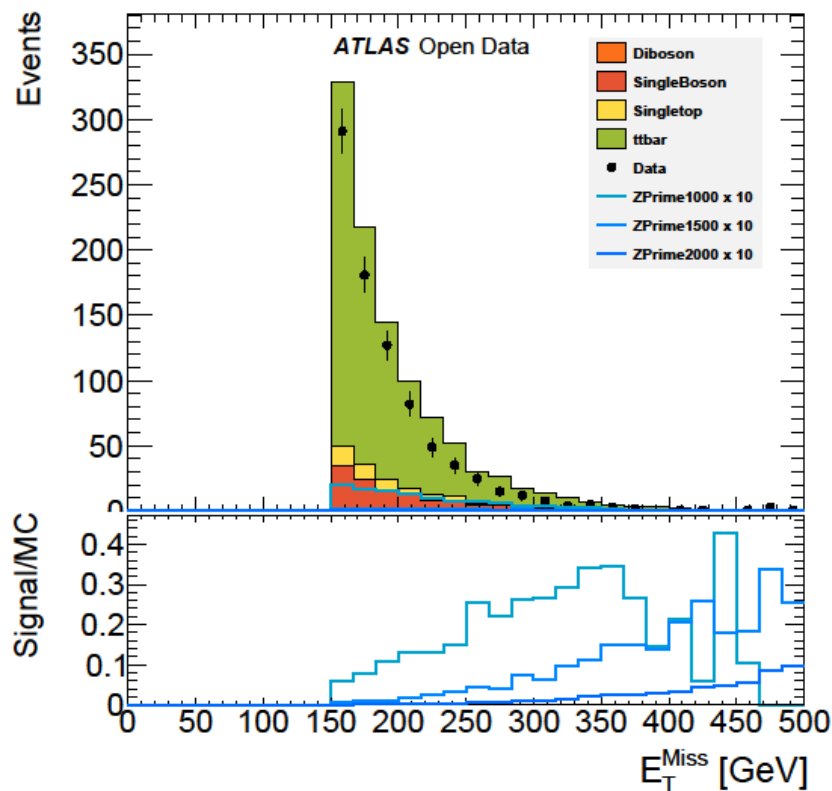


Abb. 8: Diagramm der Verteilung der fehlenden Energie in der transversalen Ebene
($MET > 150 GeV$)

3. 2. 3 Wahl des Selektionskriteriums für die Anzahl an b-jets

Wie in Kapitel 3.1.3 angesprochen, sind die entstehenden b -jets eine besondere Eigenschaft dieses Zerfalls, weshalb man einen sogenannten b -tag durchführt. Die Rekonstruktionssoftware, die aus den Detektordaten „echte“ Events erstellt, kann mit einer gewissen Wahrscheinlichkeit b -jets erkennen und als solche deklarieren. Zuallererst wird dazu in der Z-prime-Boson-Analyse verlangt, dass der Zerfall genau vier oder mehr Jets aufweist.

Dies gewährleistet man durch folgende Programmzeile:

```
if not len(goodJets) >= 4: return False
```

Anschließend stellt man an diese vier oder mehr Jets jedes Ereignisses die Bedingung, dass unter ihnen ein oder zwei *b-jets* sein müssen. Der Unterschied zwischen *b-jets* und anderen Jets ist, wie bereits in Kapitel 3.1.3 genannt, die unterschiedliche Reichweite der initialen *Quarks*. Nur bei *b-jets* lässt sich das initiale (anfängliche) Bottom-Quark rekonstruieren.

Die Programmzeile, die den *b-tag* abfragt, sieht folgendermaßen aus:

```
if n_b_jets != 1 and n_b_jets != 2: return False
```

Diesmal wurde das Selektionskriterium aufgrund der Theorie des zugrundeliegenden Zerfalls angewendet. Die Theorie sagt voraus, dass zwei Bottom-Quarks entstehen sollten, weshalb nach zwei *b-jets* gesucht wird.

Die Daten des Spurdetektors (innerster Detektor des *ATLAS*-Experiments) werden an eine Software gesendet, die aus diesen Daten mithilfe eines Rekonstruktionsalgorithmus Teilchenspuren erkennt. Da dieser Rekonstruktionsalgorithmus nicht mit vollständiger Sicherheit alle *b-jets* als solche deklariert, wird auch ein einzelner *b-jet* erlaubt. Die Informationen rund um die Spurachse fehlen und somit besteht die Möglichkeit, einen *b-jet* als solchen nicht zu erkennen. Die Wahrscheinlichkeit, dass keiner der beiden *b-jets* vom Detektor erkannt wird, ist gering und würde zudem wieder weitere Untergrundprozesse zulassen, weshalb dieser Fall vernachlässigt wird.

Der hier durchgeführte *b-tag* ist kein Bestandteil der Standard-Selektionskriterien, weswegen hier auch von einer Optimierung der Analyse gesprochen werden kann – auch wenn der Wert von $\frac{s}{\sqrt{B}}$ dabei sinkt. Nach Ausführen der statistischen Analyse durch das Programm

`StatResult.py` ergab sich folgender Wert: $\frac{s}{\sqrt{B}} = 0,342477 \sigma$

Nachdem die bisher beschriebenen Selektionskriterien angewendet wurden, erhält man die Häufigkeitsverteilung der Anzahl an *b-jets*, welche in Abb. 9 zu sehen ist.

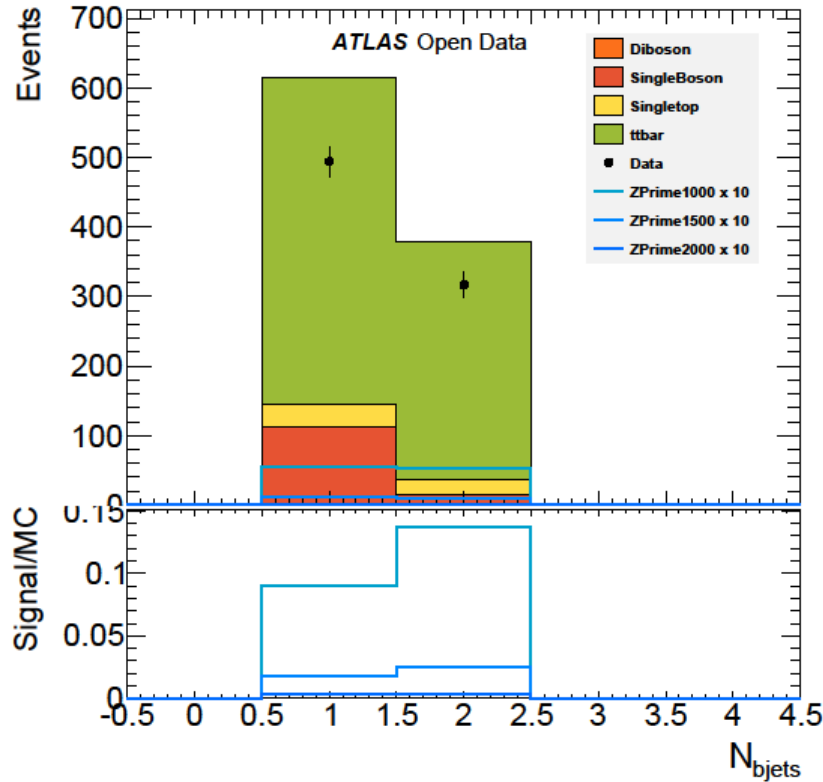


Abb. 9: Häufigkeitsverteilung der Anzahl an b -jets nach Durchführung des b -tags

3. 2. 4 Wahl des Selektionskriteriums für die Masse des leptonischen W-Bosons in der transversalen Ebene

Die transversale Masse des leptonischen W-Bosons wird durch das Neutrino und das dazugehörige *Lepton* rekonstruiert – die Teilchen, in die es zerfallen ist. Es ist anzunehmen, dass diese Masse ein großer Teil der W-Bosonen-Masse ist, da lediglich der Massenanteil in longitudinaler Richtung nicht beachtet wird bzw. auch in Bezug auf das Neutrino nicht bekannt ist. Dementsprechend wird dieses Selektionskriterium auf den beschriebenen Sachverhalt angewendet: Es werden alle Ereignisse verworfen, in denen die transversale Masse des W-Bosons zu gering ist. In der vorinstallierten Analyse für Z-prime-Bosonen ist dieser Schritt bereits mit integriert, weshalb die Schwellenwerte hier nicht genauer erläutert werden sollen. Es hat sich jedoch gezeigt, dass ein Schwellenwert von 30 GeV als Selektionskriterium für die transversale Masse des W-Bosons sinnvoll ist. In der folgenden Zeile wird dieser Schwellenwert angewendet:

```
if not mTW > 30: return False
```

Nachdem dieses Selektionskriterium angewendet wurde, erhält man die folgende Verteilung der transversalen Masse des leptonischen W-Bosons wie sie in Abb. 10 zu sehen ist.

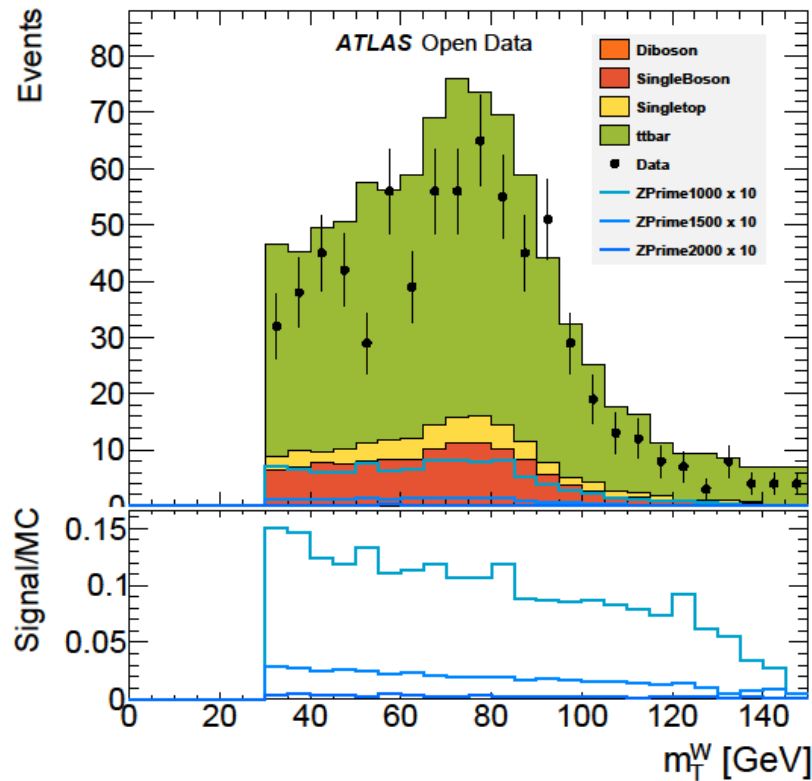


Abb. 10: Verteilung der transversalen Masse des leptonischen W-Bosons

3. 2. 5 Wahl des Selektionskriteriums für die Massendifferenz des hadronisch zerfallenden W-Bosons

Im Anschluss an die Rekonstruktion des leptonischen W-Bosons folgt nun die des hadronischen W-Bosons. Bei diesem Selektionskriterium wird das hadronisch zerfallende W-Boson rekonstruiert. Dabei werden zwei Jets selektiert, in die das W-Boson zerfallen ist. Anschließend wird die Differenz der Masse des zerfallenden hadronischen W-Bosons von der exakten experimentell bestimmten Masse berechnet, um sicherzustellen, ob es sich bei dem analysierten Teilchen tatsächlich um ein W-Boson handelt. Man würde also bei der Darstellung dieses Sachverhalts in einem Diagramm eine große Anzahl an Zerfällen bei geringen Abweichungen und eine immer geringer werdende Anzahl an Zerfällen bei größeren Abweichungen der Masse erwarten (siehe Abb. 12). Es wäre nun möglich, ein Selektionskriterium auf die Massendifferenz anzuwenden. Dafür wurde getestet, ob es sinnvoll ist, Ereignisse zu verwerfen, die eine Massendifferenz von über 40 GeV (varCut40) bzw. über 50 GeV (varCut50) von der Masse des hadronischen W-Bosons haben.

Dabei ergaben sich folgende Werte für die Signifikanz:

- varCut40: $\frac{S}{\sqrt{B}} = 0,281280 \sigma$
- varCut50: $\frac{S}{\sqrt{B}} = 0,289442 \sigma$

Jedoch hat sich nach der Analyse durch das Programm `StatResult.py` ergeben, dass ein Schnitt auf die Daten die Signifikanz nur verringern würde, weshalb dieses Selektionskriterium verworfen wurde.

In Abb. 11 sieht man die Verteilung der W-Boson-Masse. Es ist bei rund 80 GeV ein deutlicher Peak zu erkennen, weshalb man dennoch eindeutig sagen kann, dass es sich hierbei um das W-Boson ($m_{W-Boson} = 80,4 \text{ GeV}$) handelt (vgl. PATRIGNANI et. al 2016, S. 8).

In Abb. 12 sieht man zudem die Verteilung der Abweichung von der experimentell präzise bestimmten W-Boson-Masse.

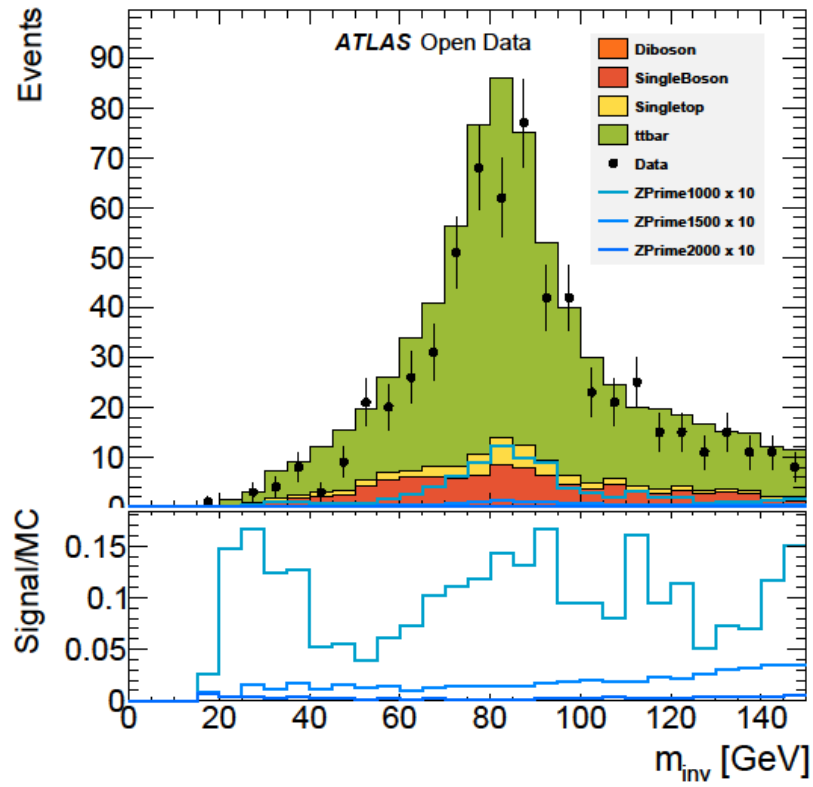


Abb. 11: Masse des hadronisch zerfallenden W-Bosons

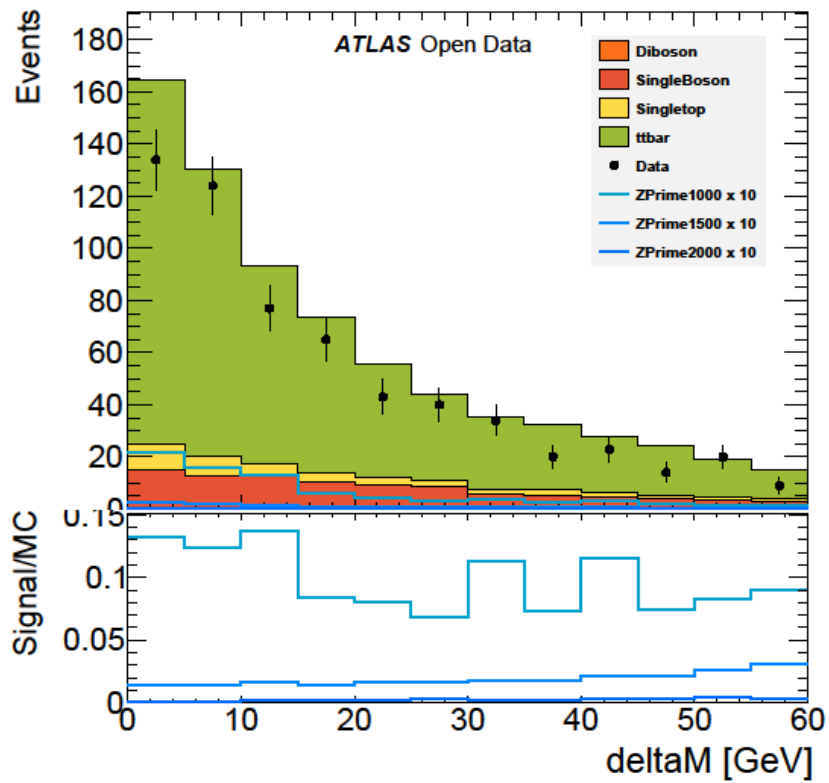


Abb. 12: Verteilung der Abweichung der bestimmten W-Boson-Masse von der exakten

3. 2. 6 Wahl des Selektionskriteriums für den Winkel zwischen dem Top-Anti-Top-Quark-Paar in der transversalen Ebene

Nachdem sichergestellt wurde, dass die selektierten Teilchen mit den vorhergesagten höchstwahrscheinlich übereinstimmen, werden aus diesen die beiden Top-Quarks rekonstruiert. Dabei wird je einem Paar aus Bottom-Quark und W-Boson ein Top-Quark zugeordnet. Anschließend kann man den Winkel $\Delta\Phi$ zwischen den Top-Quarks berechnen lassen. Dabei ist $\Delta\Phi$ der Winkel in der transversalen Ebene zwischen den beiden Top-Quarks. Top-Quarks besitzen die Eigenschaft, dass sie back-to-back zerfallen, d.h. dass der Winkel $\Delta\Phi$ zwischen den Top-Quarks rund 180° im Gradmaß bzw. π im Bogenmaß beträgt. Zu erkennen ist diese Tatsache in Abb. 13.

Bisher gelang es, das leptonische W-Boson aus dem *MET* und dem einzigen *Lepton* zu rekonstruieren. Des Weiteren wurde das hadronische W-Boson aus den zwei Jets, in die es zerfiel, rekonstruiert. Nun lässt sich mittels der bekannten Masse des Top-Quarks, den W-Bosonen je ein *b-jet* (bzw. ein anderes Jet, wenn nur ein *b-jet* gefunden wurde) zuordnen, um daraus die Top-Quarks zu rekonstruieren. Dafür wird geschaut, welches der *b-jets* zusammen mit einem der W-Bosonen näher an der bereits exakt bestimmten Top-Quark-Masse liegt ($m_{Top-Quark} = 173,2 \text{ GeV}$) (vgl. PATRIGNANI et. al 2016, S. 23).

Daraus lässt sich anschließend auch die Masse des hadronisch zerfallenden Top-Quarks bestimmen (beim leptonisch zerfallenden Top-Quark ist der Longitudinalimpuls des Neutrinos unbekannt, weshalb die berechnete Masse hier zu klein wäre). Die Masse des hadronischen Top-Quarks sieht man in Abb. 14. Sie beträgt rund 170 GeV . Da die Annahmen sehr gut mit den Messungen übereinstimmen, wurde hier kein Selektionskriterium angewendet, um die Menge an Daten möglichst groß zu halten.

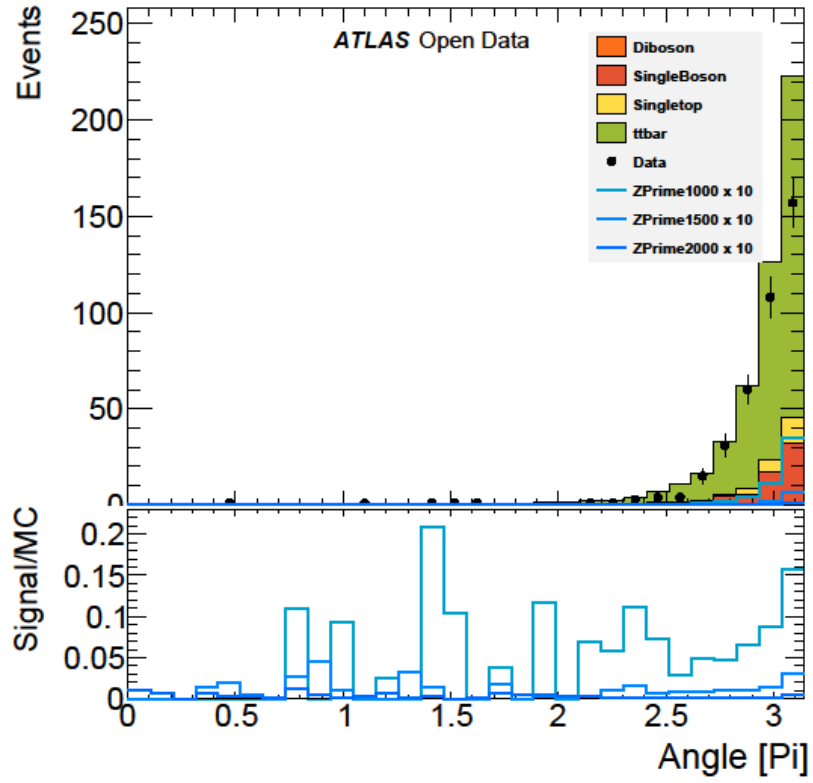


Abb. 13: Winkel $\Delta\Phi$ zwischen den beiden Top-Quarks

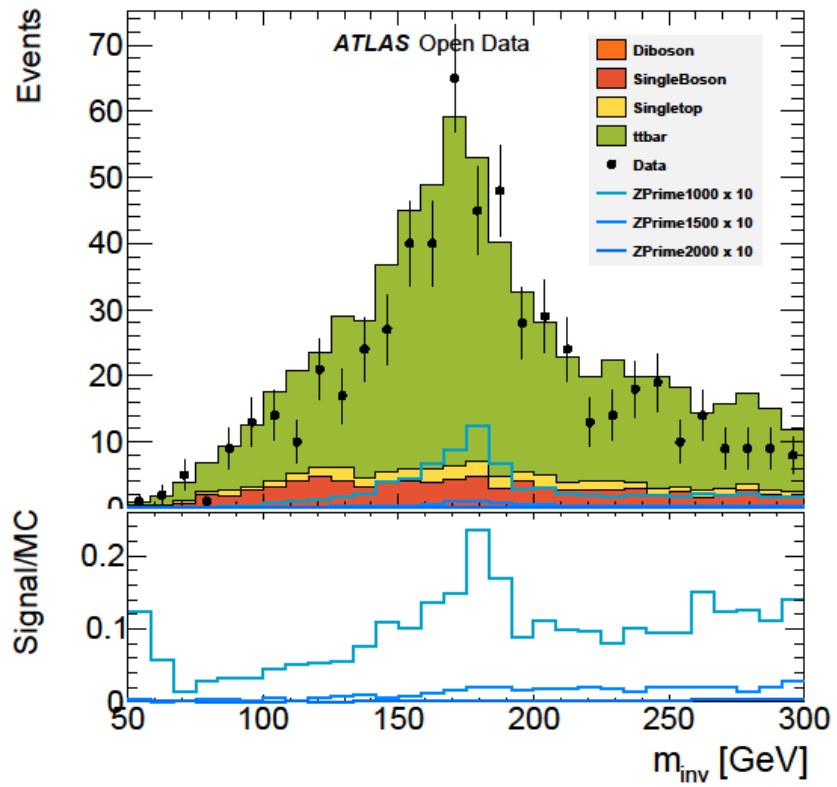


Abb. 14: Masse des hadronisch zerfallenden Top-Quarks

3. 2. 7 Zusammenfassung der Ergebnisse

In den folgenden Zeilen werden alle Ergebnisse der Selektionskriterien für eine Z-prime-Boson-Massenhypothese von 1000 GeV noch einmal zusammengefasst.

- Selektionskriterium für die Anzahl an *Leptonen*: $n_{leptons} = 1$
- Selektionskriterium für die fehlende Energie in der transversalen Ebene: $MET > 150\text{ GeV}$
- Selektionskriterium für die Anzahl an Jets: $n_{jets} \geq 4$
- Selektionskriterium für die Anzahl an *b-jets*: $1 \leq n_{b-jets} \leq 2$
- Selektionskriterium für die Masse des leptonischen W-Bosons in der transversalen Ebene: $m_{W-Boson}^T \geq 30\text{ GeV}$

Nun soll abschließend ein Blick auf verschiedene Massenhistogramme des analysierten Zerfalls geworfen werden. Dabei werden die verschiedenen Massenvariablen verwendet, die in diesem Kapitel einführend erläutert wurden (siehe Kapitel 3.2.1). Zuerst werden hierfür die Diagramme der drei verschiedenen Massenvariablen gezeigt, die anschließend genauer analysiert werden sollen. Danach werden weitere Ergebnisse thematisiert.

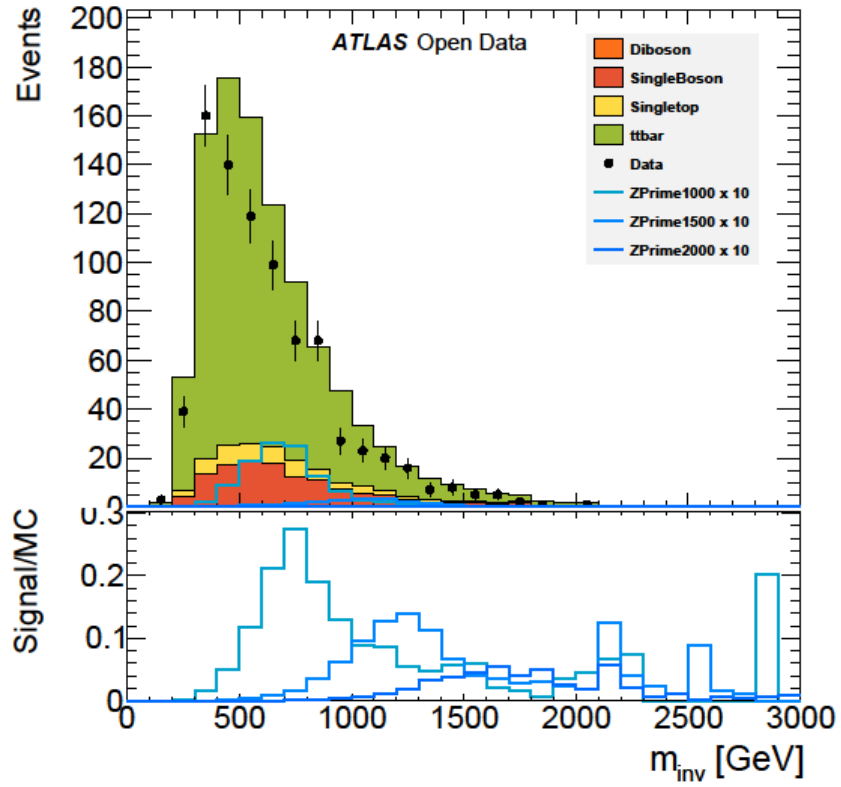


Abb. 15: Die sichtbare Masse (lineare Ordinatenachse)

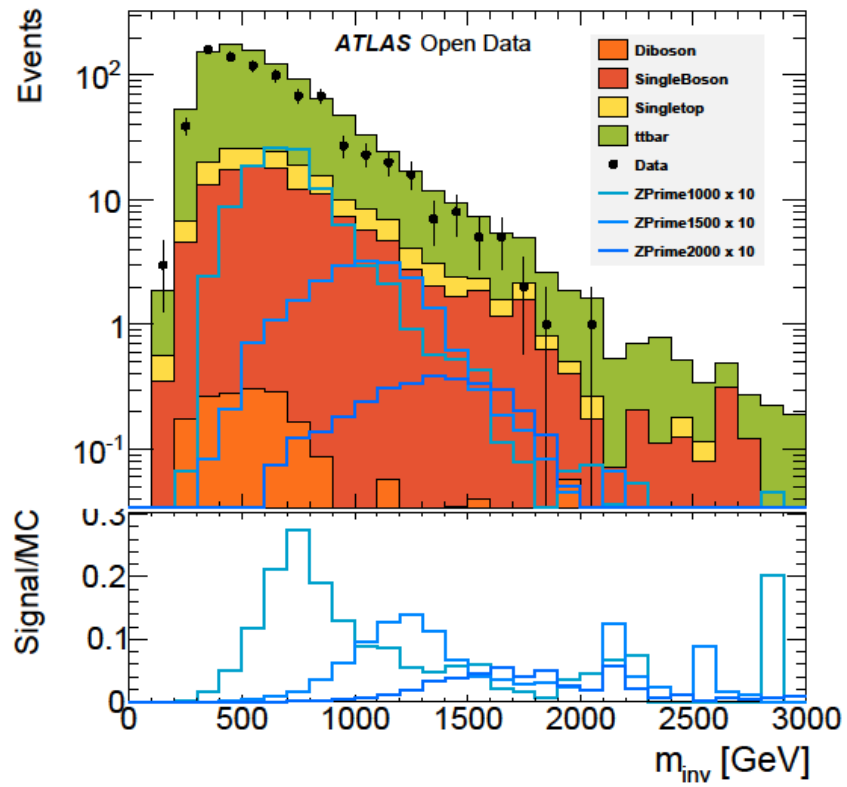


Abb. 16: Die sichtbare Masse (logarithmische Ordinatenachse)

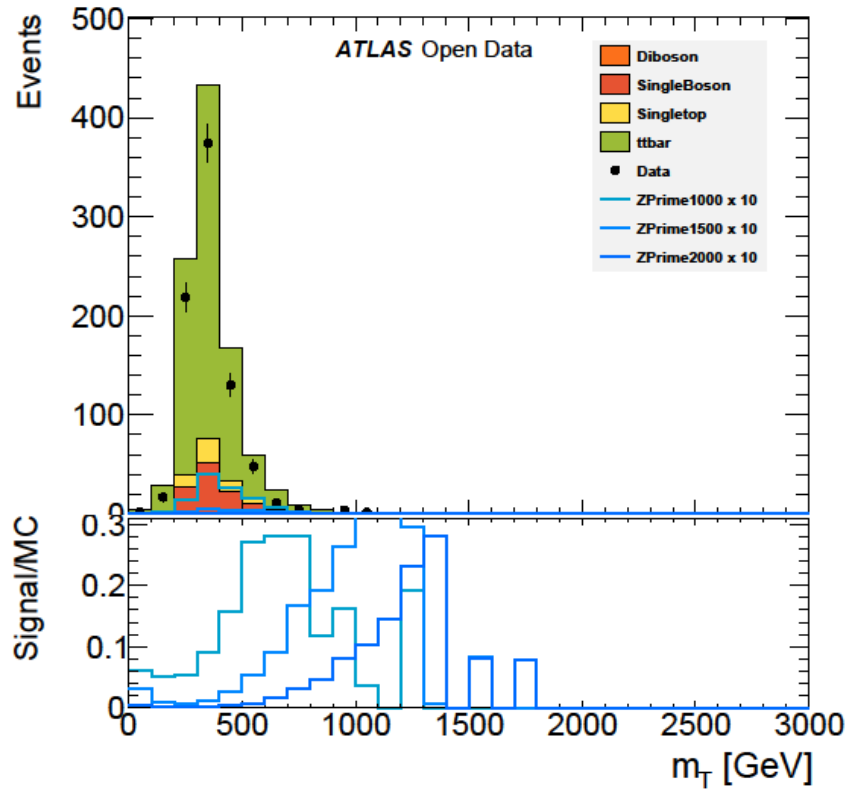


Abb. 17: Die absolute Transversalmasse (lineare Ordinatenachse)

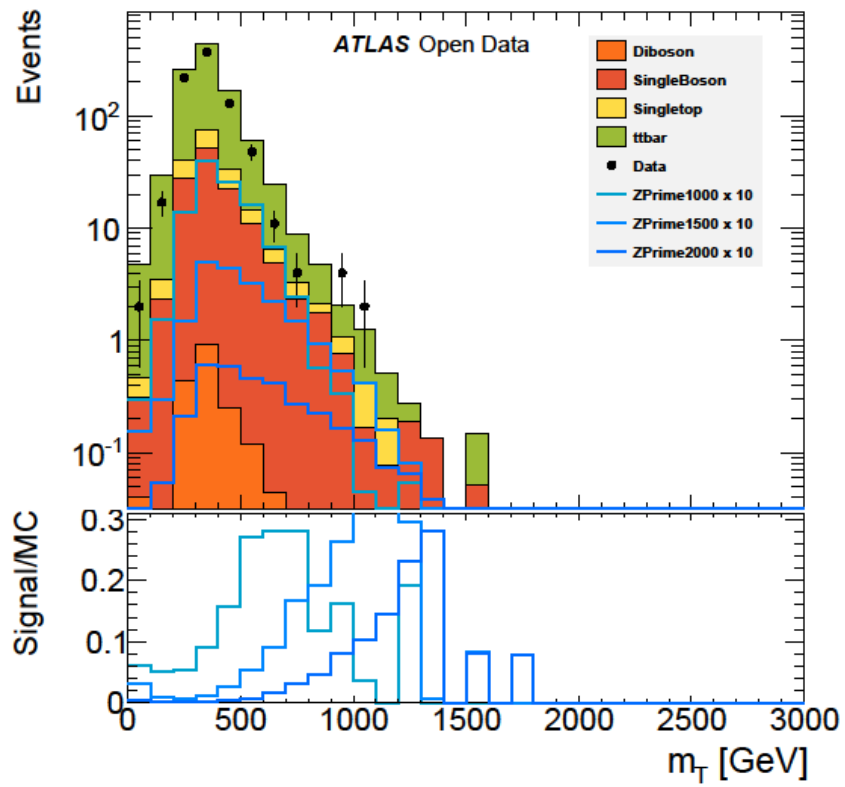


Abb. 18: Die absolute Transversalmasse (logarithmische Ordinatenachse)

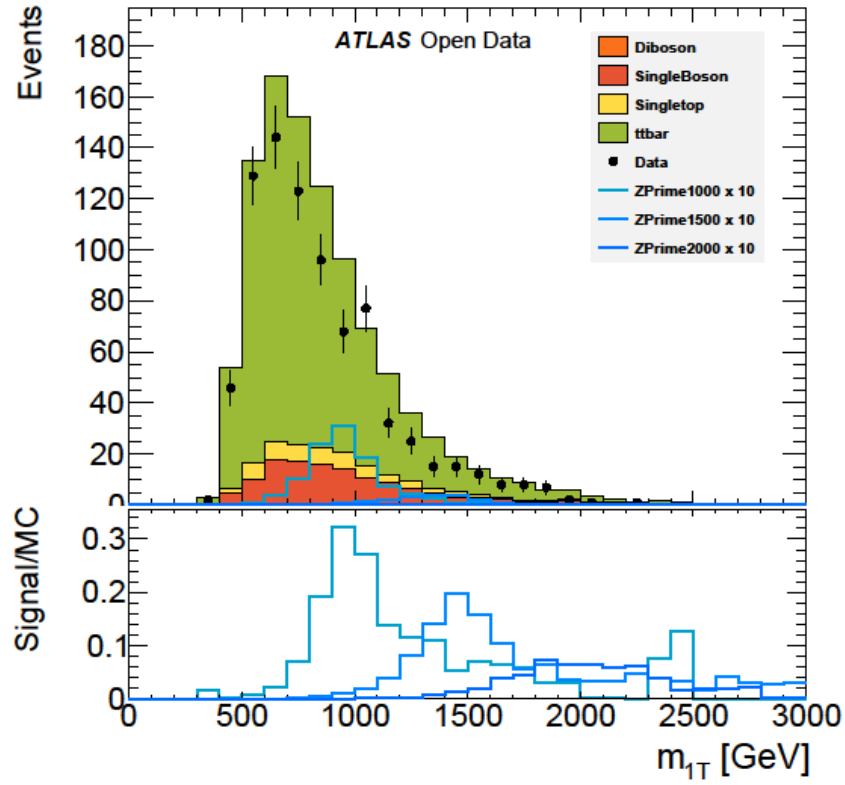


Abb. 19: Die Transversalmasse mit Schrankencharakter des Z-prime-Bosons (lineare Ordinatenachse)

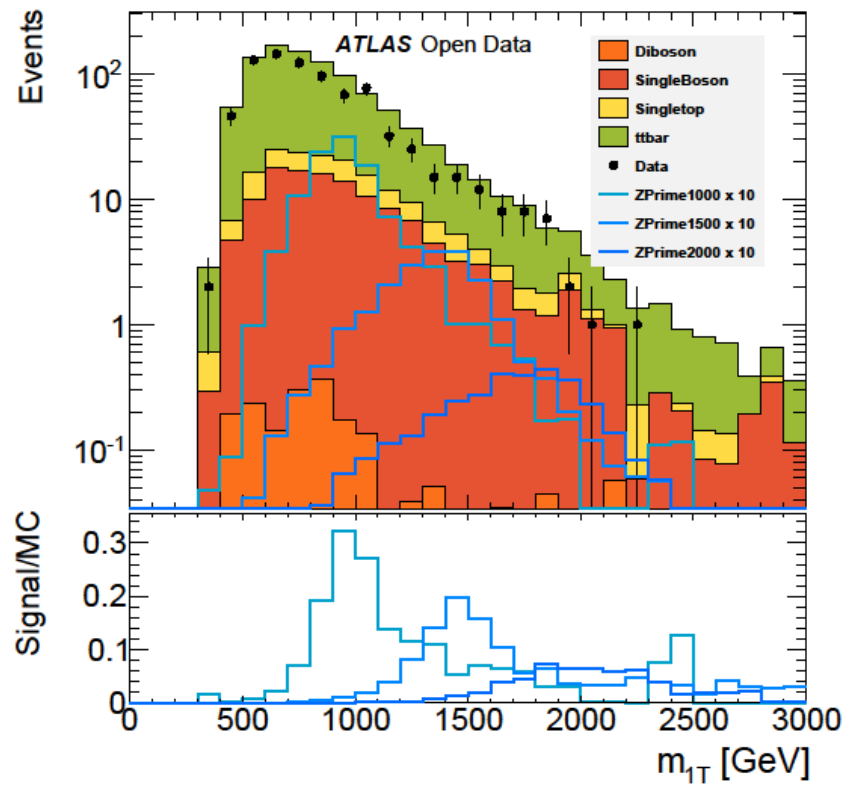


Abb. 20: Die Transversalmasse mit Schrankencharakter des Z-prime-Bosons (logarithmische Ordinatenachse)

In den gezeigten Diagrammen (Abb. 15 bis Abb. 20) ist erkennbar, dass solche mit logarithmischer Ordinatenachse die Ergebnisse besser wiedergeben, da das Signal für diverse Z-prime-Boson-Massenhypothesen besser zu sehen ist. Des Weiteren lässt sich erkennen, dass die Transversalmasse mit Schrankencharakter die Massenhypothese am ehesten widerspiegelt (erkennbar am Peak über der jeweiligen Massenhypothese) (siehe Abb. 19 und Abb. 20). Bei zukünftigen Analysen sollte man also diese Massenvariable gegenüber den anderen beiden zur Darstellung der Ergebnisse bevorzugen. In den folgenden Abschnitten soll nun noch einmal genauer auf die gezeigten Massenhistogramme eingegangen werden.

Zu den Massenhistogrammen der sichtbaren Masse

In den Diagrammen der sichtbaren Masse (siehe Abb. 15 und Abb. 16) erkennt man beispielsweise einen Signalpeak bei rund 700 GeV . Dies ist einerseits sehr gut, da überhaupt ein Signal erkennbar ist, aber auch andererseits noch nicht gut genug, da eigentlich ein Z-prime-Boson der Massenhypothese 1000 GeV rekonstruiert werden sollte. Bei den anderen Massenhypothesen von 1500 GeV und 2000 GeV tritt das gleiche Problem auf: Der Signalpeak kommt schon 300 bis 500 GeV zu früh. Dennoch ist er im Diagramm mit logarithmischer Ordinatenachse gut sichtbar. Da in der Berechnung dieser Massenvariable das Neutrino vollkommen vernachlässigt wird, ist der Signalpeak dementsprechend noch zu gering.

Zu den Massenhistogrammen der absoluten Transversalmasse

In den Diagrammen der absoluten Transversalmasse (siehe Abb. 17 und Abb. 18) erkennt man, dass sich im größeren Massenbereich (ab ca. 1000 GeV) fast gar keine Einträge mehr befinden. Zudem sind alle drei Signalpeaks unabhängig von der Massenhypothese an der gleichen Stelle im Diagramm (zu sehen in Abb. 18 bei rund 500 GeV). Diese Massenvariable ist daher auch eher ungeeignet für eine Rekonstruktion der Masse des Z-prime-Bosons und für die Suche nach neuen Resonanzen.

Zu den Massenhistogrammen der Transversalmasse mit Schrankencharakter

Die voran gezeigten Diagramme zur Transversalmasse mit Schrankencharakter des Z-prime-Bosons (siehe Abb. 19 und Abb. 20) stellen das Hauptergebnis dieser Arbeit dar. Beispielsweise lässt sich der Signalpeak für die Z-prime-Boson-Massenhypothese von 1000 GeV sehr gut rekonstruieren. Dies ist daran erkennbar, dass sich der Signalpeak genau über 1000 GeV befindet. Auch der Signalpeak der Z-prime-Boson-Massenhypothese von 1500 GeV ist noch relativ gut erkennbar. Diese Signalpeaks sind vor allem in dem Diagramm mit logarithmischer

Ordinatenachse erkennbar, weswegen diese – wie eingehend erwähnt – hier bevorzugt werden. Weiterhin ist in Abb. 19 erkennbar, dass bei der Z-prime-Boson-Massenhypothese von 1000 GeV bei genau 1000 GeV rund 30 Events abgetragen sind – durch die zehnfache Überhöhung heißt dies, dass rund 3 Signalereignisse erwartet werden. Würde es ein Z-prime-Boson der Masse 1000 GeV geben, ließe sich dieses mit mehr Daten und komplizierteren statistischen Methoden – als diese, die in der vorliegenden Arbeit verwendet wurden – finden. In dem hier gezeigten Fall heißt dies, dass in der Klasse bei 1000 GeV (eng.: bin) ca. 3 Events mehr gemessen werden müssten. Man erwartet vom *SM* her dementsprechend rund 100 Ereignisse und mit der *Erweiterung* durch ein Z-prime-Boson ein paar mehr Events. Das untere Diagramm zeigt passend dazu an, wie viele Ereignisse man relativ zum *SM* erwarten würde: rund 3 % (zehnfach weniger als angezeigt, durch die angesprochene Überhöhung der Signalereignisse). Ob dieser Überschuss an Ereignissen letztendlich statistisch signifikant ist oder nicht, hängt von der absoluten Anzahl der Ereignisse nach dem *SM* ab. Zum Beispiel sind 3 % mehr Ereignisse bei insgesamt 10 überhaupt nicht signifikant, während 3 % mehr Ereignisse bei 10.000 Ereignissen insgesamt schon recht signifikant ist. (Anmerkung: Die hier genannten Zahlen, die aus den Diagrammen abgelesen wurden, sind nur grob geschätzt.) Für den sehr gut rekonstruierten Signalpeak bei 1000 GeV lässt sich nun auch die Signifikanz bestimmen. Dazu wird ein Massenfenster festgelegt, in dem man den Wert von $\frac{S}{\sqrt{B}}$ mithilfe des Programms `StatResult.py` berechnet. Hier wurde das Massenfenster von 900 GeV bis 1100 GeV gewählt (entspricht dem 9. bis 11. bin im Diagramm). Nach der Signifikanzanalyse ergab sich folgender Wert: $\frac{S}{\sqrt{B}} = 0,435\sigma$ (Bildschirmausschnitt, der diesen Wert belegt, im Anhang).

Weitere Ergebnisse

Allgemein lässt sich zunächst sagen, dass das *Standardmodell der Teilchenphysik* kompatibel mit den in dieser Besonderen Lernleistung vorgenommenen Messungen ist – es wurde keine signifikante Abweichung der Daten von der Theorie festgestellt.

Ziel dieser Arbeit ist es gewesen, die Selektionskriterien für die Suche nach Z-prime-Bosonen zu optimieren. Die Qualität der Optimierung wurde mittels der Signifikanz $\frac{S}{\sqrt{B}}$ bestimmt. Auch die Tatsache, ob es gelungen ist, weitere am Zerfall beteiligte Teilchen zu rekonstruieren, wurde in die Betrachtung mit einbezogen. Im folgenden Diagramm sieht man die Entwicklung des Maßes $\frac{S}{\sqrt{B}}$ während der schrittweisen Optimierung der Selektionskriterien.

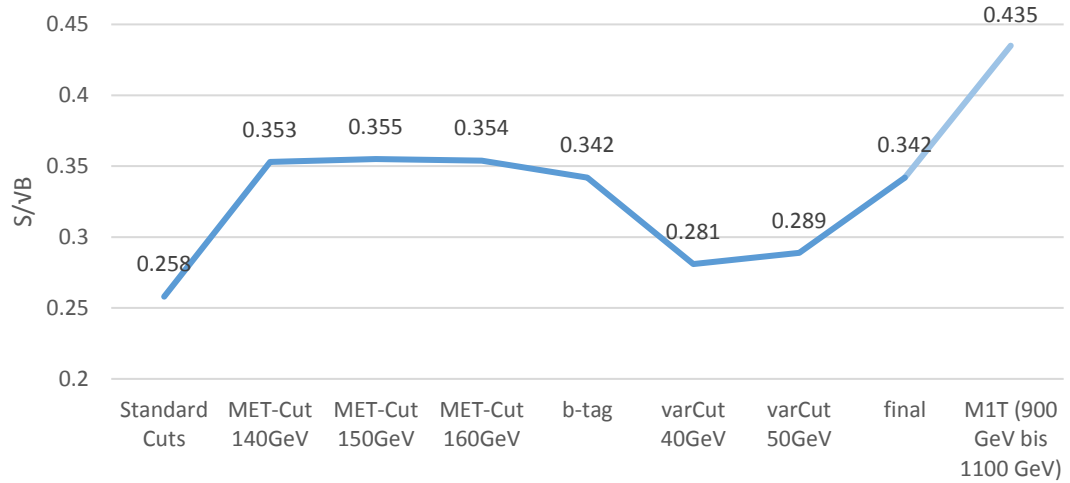


Abb. 21: Entwicklung der Signifikanz $\frac{S}{\sqrt{B}}$ während der schrittweisen Optimierung der Selektionskriterien

Es ist erkennbar, dass der Wert von $\frac{S}{\sqrt{B}}$ während der Optimierung deutlich gestiegen ist ($0,258 \sigma_{Standard\ Cuts} < 0,342 \sigma_{final}$). Daher kann man schlussfolgern, dass das Ziel, die Selektionskriterien zu verbessern, gelungen ist. Des Weiteren sieht man, dass der Wert nicht monoton steigt, sondern auch einmal fällt. Hier wurden mögliche andere Selektionskriterien ausgeschlossen (zum Beispiel das angesprochene Selektionskriterium auf die Massendifferenz des hadronischen W-Bosons, siehe dazu Kapitel 3.2.5), um letztendlich das bestmögliche Ergebnis zu erhalten. Auch hat das finale Ergebnis nicht die höchste Signifikanz ($\sigma_{MET>150\ GeV} > \sigma_{final}$), was an dem Selektionskriterium auf die Anzahl an b -jets liegt. Die Signifikanz des MET -Cuts und des b -tags sind vergleichbar. Dennoch kann die Optimierung der Selektionskriterien durch den b -tag belegt werden, da in diesem Cut eine deutliche Erweiterung der Standard-Selektionskriterien besteht, sodass gezielter nach einem Z-prime-Boson in diesem Zerfall gesucht werden kann. Zudem sinkt der Wert der Signifikanz nicht allzu stark, weswegen dies hier vertretbar ist. Des Weiteren wird durch lediglich ein bzw. zwei b -jets die Eindeutigkeit des Zerfalls klarer, sodass man bei der Rekonstruktion der Z-prime-Boson-Masse mehr Erfolg hat. Bei drei bzw. vier b -jets, die zuvor zugelassen wurden, ist die Rekonstruktion der Zerfallstopologie komplizierter, da so auch Mehrdeutigkeiten entstehen.

Der letzte im Diagramm gezeigte Wert von $\frac{S}{\sqrt{B}}$ entspricht der Signifikanz des Massenfensters von 900 GeV bis 1100 GeV im Diagramm der Transversalmasse mit Schrankencharakter. Diese Signifikanz ist deutlich größer als die davor, da hier nur der Signalpeak betrachtet wird (dargestellt durch eine andere Farbe). Vor allem zeigt dies, dass die Signifikanz an dieser Stelle eindeutig größer ist, als wenn das gesamte Massenfenster betrachtet wird.

Wie bereits erwähnt, sind die Signalthypothesen überall mit einem Faktor zehn skaliert, um sie besser sichtbar zu machen. Zudem sind auch die Werte der Signifikanz mit dem Faktor zehn überschätzt. Das heißt, dass die Werte bei einhundertfacher Datenmenge wieder exakt sind.

Zurzeit hat der *LHC* seinen sogenannten Run2 – die zweite lange Phase, in der Daten aufgenommen werden. Seit der Erweiterung des *LHC* im Jahr 2013 können bei Teilchenkollisionen noch größere Schwerpunktsenergien von bis zu 14 TeV erzeugt werden. Zuvor lief der sogenannte Run1 mit einer Schwerpunktsenergie von bis zu 8 TeV . Es wird in Run2, der noch bis nächstes Jahr läuft, erwartet, dass ungefähr die einhundertfache Menge an Daten im Vergleich zu Run1 aufgezeichnet wird. Weiterhin heißt das, dass die in dieser Arbeit gezeigten Werte der Signifikanz eine grobe Schätzung für die Erwartung nach Run2 sind.

Im Jahr 2018 wird der *LHC* abgeschaltet, um aufgerüstet zu werden, damit noch mehr Daten aufgenommen werden können. Nach diesem Umbau heißt der *LHC* dann High-Luminosity-Large-Hadron-Collider (HL-LHC), da er noch leistungsstärker sein wird.

3. 2. 8 Methodenreflexion

Die Suche nach neuen, theoretisch vorhergesagten Elementarteilchen ist eines der Hauptforschungsgebiete der Teilchenphysik. Mit dem *ATLAS*-Detektor wird unter anderem nach *Z*-prime-Bosonen gesucht. Ein untersuchter Zerfallskanal dieses Teilchens ist $\bar{q} q \rightarrow Z' \rightarrow \bar{t} t \rightarrow W^- W^+ \bar{b} b \rightarrow \bar{l} \nu \bar{q}' q' \bar{b} b$. Die dabei entstehenden Teilchen gilt es zu rekonstruieren, um gezielt nach dem *Z*-prime-Boson zu suchen. Hierbei ist eine Optimierung der Eventselektion sehr sinnvoll, um Signal- noch besser von Untergrundereignissen trennen zu können. Zudem ist das bei dem Zerfall entstehende Neutrino im Detektor nicht nachweisbar. Deshalb ist es notwendig geeignete Massenrekonstruktionsvariablen zu finden, die die invariante Masse des Zerfalls abschätzen, um damit auf die *Z*-prime-Boson-Masse schließen zu können.

Für diese Fragestellungen wurde in der vorliegenden Arbeit die *VM* des *ATLAS* OpenData-Portals genutzt. Das darin enthaltene Analyseprogramm des *Z*-prime-Bosons wurde für den oben genannten Zerfall schrittweise optimiert. Dabei wurde die Optimierung einerseits an der Signifikanz $\frac{S}{\sqrt{B}}$ bemessen und andererseits an der Tatsache, ob es gelungen ist, weitere am Zerfall beteiligte Teilchen zu rekonstruieren. Beides konnte in dieser Arbeit erreicht werden, auch wenn der Wert von $\frac{S}{\sqrt{B}}$ während der Optimierung sinkt. Der Grund hierfür ist, dass dieser Term auch sensibel auf eine geringe Anzahl an Events ist und hiermit auch einmal sinkt, da eine vergleichsweise geringe Datenmenge genutzt wurde.

Dennoch hat die Optimierung des Programms Grenzen. Eine Aufgabe für die Zukunft wäre

beispielsweise, die Analyse mit noch mehr Daten durchzuführen, um statistische Unsicherheiten zu verringern. So ließen sich zudem verschiedene Massenhypothesen bzw. Wirkungsquerschnitte eines hypothetischen Z-prime-Bosons ausschließen. Jedoch wird dies die Aufgabe der Teilchenphysiker am *CERN* sein.

Ebenso entsprach der Erkenntnisweg in dieser Arbeit dem der Teilchenphysiker. Es wurden Teilchenkollisionen statistisch ausgewertet, um so anschließend die Fragestellungen adäquat zu beantworten.

3. 3 Erweiterung des ATLAS OpenData-Portals mit ROOTbooks

Die bisher beschriebene Analyse der Z-prime-Bosonen war durchaus sehr komplex und für Physik- und Programmieranfänger sicherlich schwer verständlich. Jedoch ist es auch die Aufgabe des *CERN* einerseits dafür zu sorgen, weiterhin junge Menschen für Teilchenphysik zu begeistern, aber auch andererseits der Allgemeinheit zugänglich zu machen, was dort erforscht wird. Dementsprechend ist eine Analyse, wie sie vorangehend lang erläutert wurde, eher ungeeignet. Ziel des *CERN* es also auch einfacher verständliche Analysen zu schreiben, um die Grundprinzipien von Analysen in der Hochenergiephysik (HEP) zu vermitteln und so einen ersten Einstieg in die Teilchenphysik und die damit verbundene Analyse von Teilchenkollisionen zu schaffen.

Dafür ist das OpenData-Portal des *CERN* – und hier explizit des *ATLAS*-Experiments – sehr geeignet. Hier kann man sich auch mit einfachen Möglichkeiten bereits viel Wissen aneignen. Für jede Wissensstufe gibt es unterschiedliche Möglichkeiten. Beispielsweise kann man sich, wie in dieser Arbeit beschrieben, eine *VM* herunterladen und bereits einfache implementierte Analysen ausführen. Dies erfordert anfänglich zwar ein wenig Arbeit, aber funktioniert anschließend sehr gut.

Eine weitere Möglichkeit stellt die Datenanalyse mittels sogenannter Jupyter Notebooks dar. Dies sind Dateien, die einerseits aus Quelltext, der sich ausführen lässt, bestehen und andererseits aus Textelementen, die diesen Code beschreiben. Somit ist es sehr gut möglich Programme für Anfänger verständlich darzustellen. In Abb. 22 sieht man, wie ein solches Jupyter Notebook aussehen kann.

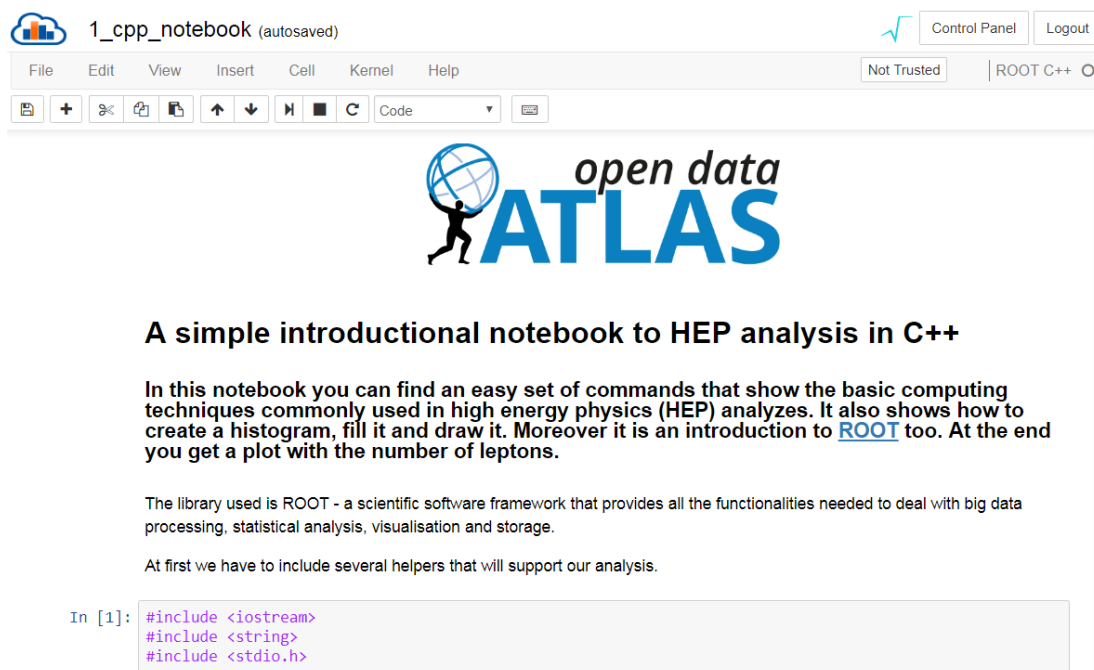


Abb. 22: Mögliches Aussehen eines Jupyter Notebooks

Man erkennt zunächst, dass der Text in der Mitte von zwei unterschiedlichen Typen ist: Quelltext und beschreibende Textelemente (z.B. mittels Markdown). Dieser Code oder Text befindet sich in sogenannten Boxen, die sich auch einzeln ausführen lassen. Des Weiteren ist oben eine Menü-Leiste erkennbar, mit der sich das Jupyter Notebook bearbeiten aber auch ausführen lässt. In der rechten oberen Ecke sieht man, dass es sich um C++ Quelltext handelt (C++ Kernel).

3. 3. 1 Ziele für die CERN-Projektwochen 2017

Für die zwei Wochen, die ich am *CERN* im Rahmen der Netzwerk Teilchenwelt CERN-Projektwochen gewesen bin, war meine Aufgabe die Erstellung sogenannter *ROOTbooks*. Dies sind Jupyter Notebooks mit einer implementierten *ROOT*-Library für *Python* oder C++, sodass statistische Analysen großer Datenmengen besser möglich sind. Das Programmpaket *ROOT* wurde am *CERN* entwickelt als Daten von Teilchenkollisionen zunehmend digital aufgenommen wurden und nun Software zur Auswertung der Daten notwendig war.

Zudem war es auch ein Ziel, diese *ROOTbooks* in verschiedenen Schwierigkeitsgraden und auch in *Python* und C++ zu schreiben. So soll ein Einstieg in beide Programmiersprachen geboten werden und gleichzeitig eine Weiterentwicklung möglich sein. Ebenfalls ist es den Anwendern nach diesem Einstieg möglich, sich selbst mit Jupyter Notebooks auszuprobieren, indem sie eigene schreiben.

Nach der Erstellung dieser *ROOTbooks* wurden sie mit *SWAN* ausgeführt. *SWAN* steht für Service for **W**eb based **A**Nalysis und ist wieder eine am *CERN* entwickelte Technologie, die *CERN*-Mitgliedern erlaubt, Daten mithilfe der Server am *CERN* schneller auswerten zu lassen, da diese deutlich mehr Rechenleistung haben als Privat-Computer.

Zuallerletzt – nach mehrmaliger Überprüfung der *ROOTbooks* – sollen sie im *ATLAS* OpenData-Portal veröffentlicht werden, um sie allen zugänglich zu machen.

3. 3. 2 Vor- und Nachteile von ROOTbooks

Bei der Arbeit mit den *ROOTbooks* sind mir diverse Tatsachen bezüglich ihres Nutzens aufgefallen. In der folgenden Tabelle sind einmal Vor- und Nachteile von *ROOTbooks* aus meiner Sicht aufgeführt, die anschließend noch ein wenig erläutert werden sollen.

Vorteile	Nachteile
• nützlich für Bildung und Training • Programmiercode einfach dokumentierbar (beispielsweise mit Markdown) • klare Struktur und eindeutige Erkennbarkeit, was ausgeführt wird • einfache Implementierung in Webseiten (über GitHub beispielsweise)	• mangelnde Leistung bei großen Datenmengen • keine guten Optionen zur Darstellung von vielen Diagrammen • Schleifen lediglich in einer Box ausführbar

Während der Arbeit mit den *ROOTbooks* hat sich gezeigt, dass sie aufgrund ihres logischen Aufbaus, ihrer klaren Struktur und ihrer einfachen Bedienung wirklich sehr sinnvoll für Bildungs- und Trainingszwecke sind. Zudem ist jederzeit erkennbar, welche Stelle des Programms aktuell ausgeführt wird. Ebenso ist die Implementierung von *ROOTbooks* in Webseiten sehr gut möglich.

Nichtsdestotrotz gibt es einige Nachteile, wie beispielsweise eine schlechte Darstellung vieler Diagramme aufgrund fehlender Optionen. Jedoch sind damit sehr viele Diagramme gemeint (wie zum Beispiel über 100), was bei Analysen in der Teilchenphysik nicht unüblich ist. Auch kommt es bei größeren Datenmengen, wie zum Beispiel mehreren Millionen Teilchenkollisionen, zu Leistungsproblemen, wenn sie auf einem konventionellen Computer analysiert werden. Zudem ist es ein Problem, dass man Schleifen nicht über mehrere Boxen ausdehnen kann, da somit Selektionskriterien nicht innerhalb der Schleife erklärt werden können.

3. 3. 3 Ergebnisse der CERN-Projektwochen 2017

Insgesamt konnten vier fertige *ROOTbooks* erstellt werden – jeweils zwei in *Python* und *C++*. In beiden Programmiersprachen wurde ein einfacheres *ROOTbook* geschrieben, welches eine Einleitung gibt und sehr kurz ist. Es importiert lediglich notwendige Anwendungen, erstellt dann ein Histogramm und füllt dieses letztendlich mit Daten – der Anzahl an *Leptonen*, die bei der Teilchenkollision gemessen wurden.

Zusätzlich wurde in beiden Programmiersprachen ein etwas komplizierteres *ROOTbook* geschrieben. Seine Funktionsweise ist dem einfacheren ähnlich, jedoch wendet es einige Selektionskriterien an, um einen bestimmten Prozess zu selektieren. Und zwar sucht dieses Programm nach einem Z^0 -Boson, welches in ein *Lepton* und ein Antilepton zerfällt. Es muss also beispielsweise nach entgegengesetzt elektrisch geladenen *Leptonen* gesucht werden, da das Z^0 -Boson elektrisch neutral ist.

Einehbar sind die erstellten *ROOTbooks* über folgenden Link:

http://opendata.atlas.cern/webanalysis/new_ROOTbooks.php

Dabei gibt es verschiedene Möglichkeiten, die *ROOTbooks* zu betrachten:

- Der Notebookviewer von Jupyter lässt eine reine Betrachtung der *ROOTbooks* zu.
- Über GitHub ist es möglich, die *ROOTbooks* auch herunterzuladen.
- Für CERN-Mitglieder kann SWAN genutzt werden.

Denkbar wäre darüber hinaus eine Implementierung der Z-prime-Boson-Analyse in *ROOTbooks*, um auch aktuelle Forschungsinhalte vorzustellen. Jedoch wird dies einen größeren Zeitaufwand verursachen, da solche Analysen sehr komplex sind (wie eingehend erwähnt). Die in dieser Arbeit erzielten Ergebnisse wären hierfür der erste Anfang.

Grundsätzlich lässt sich sagen, dass *ROOTbooks* eine sehr gute und nützliche Erweiterung des ATLAS OpenData-Portals darstellen und hiermit der erste Schritt dafür getan wurde. Ferner ist in kommender Zeit der weitere Ausbau des ATLAS OpenData-Portals geplant und teilweise auch schon in Arbeit.

4. Danksagung

Nachdem ich nun diese Besondere Lernleistung geschrieben habe, bin ich sehr glücklich zu sehen, was daraus geworden ist. Vor allem hat es mich gefreut, dass ich mich hiermit noch einmal eingehend mit der Teilchenphysik beschäftigen konnte.

Natürlich wäre dies ohne die Hilfe meiner Betreuer, meiner Familie und auch meiner Freunde nicht möglich gewesen. Ganz besonders möchte ich hier Franziska Iltzsche und Carsten Bittrich danken, die mich im April an der TU Dresden betreut haben und auch immer bei fachlichen Fragen zur Verfügung standen. Des Weiteren möchte ich Stefanie Todt und Arturo Sanchez danken, die mich während der *CERN*-Projektwochen 2017 unterstützt haben und dafür gesorgt haben, dass auch die Arbeit dort ein voller Erfolg wurde.

Erwähnt sei an dieser Stelle natürlich auch Herr Erik Oese, mein Betreuer vom Gymnasium Luisenstift, der mit seinen Hinweisen eine deutliche Verbesserung der Fachsprache bewirkte. Vor allem freute es mich, dass er trotz seiner Abordnung an die TU Dresden weiterhin mein Betreuer blieb und mir damit ungemein half. Auch möchte ich der Direktorin meiner Schule Frau Heike Stolzenhain meinen Dank aussprechen, die meinen Aufenthalt am *CERN* im Oktober genehmigte und so meine Neugier nicht aufhielt. Ebenso bedanke ich mich bei meiner Tutorin Frau Kathrin Kothe, die mich immer unterstützte, um mir eine erfolgreiche Arbeit zu ermöglichen.

Auch bin ich dem Netzwerk Teilchenwelt sehr dankbar, das mein Interesse an der Teilchenphysik seit Beginn an unterstützte und mir auch die *CERN*-Projektwochen ermöglichte.

Zudem möchte ich auch meiner Familie und vor allem meiner Freundin Sophie Tengler danken, die mir während der Arbeit den Rücken stärkten und immer ruhig blieben, wenn es bei mir anstrengend wurde. Ebenfalls seien meine Freunde nicht unerwähnt. Durch ihre regelmäßigen Motivationen habe ich immer Lust und Spaß daran gehabt, diese Arbeit zu verfassen.

Abschließend möchte ich noch sagen, dass ich mich nun – durch all die Unterstützung – riesig auf ein Physikstudium nach Abschluss meines Abiturs freuen darf.

Anhang

Zur Einleitung

Dass die Aussagen des *Standardmodells* sehr gut mit den Messungen der Teilchenphysiker übereinstimmen, lässt sich beispielsweise an den sogenannten Summary Plots der *ATLAS*-Kollaboration erkennen. In der folgenden Abbildung sieht man ein Diagramm, welches die theoretischen Vorhersagen des *Standardmodells* (grau) mit den gemessenen Wirkungsquerschnitten (bunt) vergleicht.

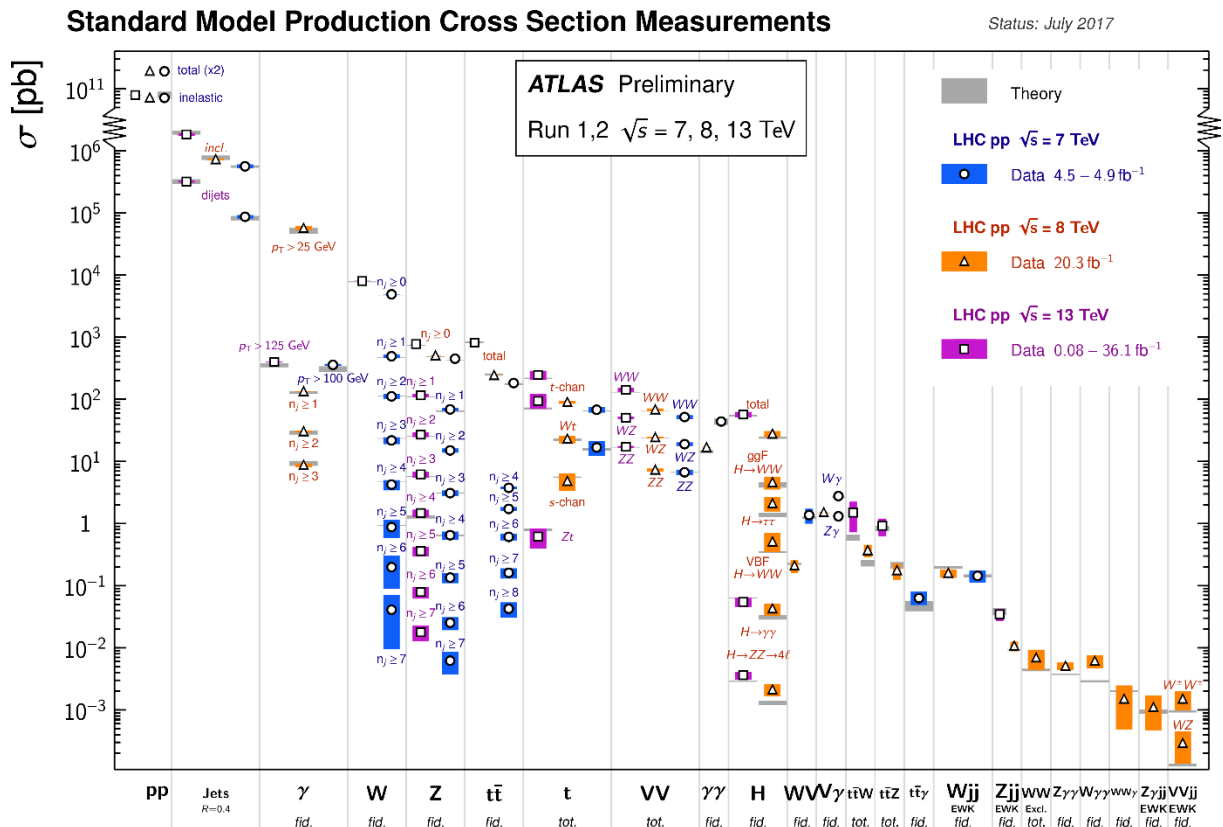


Abb. 23: Messung von Wirkungsquerschnitten, die durch das SM vorhergesagt werden

Es ist deutlich erkennbar, dass die Theorie sehr gut mit den gemessenen Daten übereinstimmt. Dadurch ist das *Standardmodell der Teilchenphysik* optimal bestätigt.

Zu Kapitel 2. 2. 2: Herleitung, dass $1 \frac{eV}{c^2} \approx 1,8 \cdot 10^{-36} \text{ kg}$

$$E = m \cdot c^2 \quad | \div c^2$$

$$m = \frac{E}{c^2}$$

E ... Energie

m ... Masse

c ... Vakuumlichtgeschwindigkeit

$$[m] = 1 \text{ kg} = 1 \frac{\text{eV}}{c^2} \cdot \text{Faktor}$$

$$1 \text{ eV} \approx 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ J (auch } \frac{\text{kg} \cdot \text{m}^2}{\text{s}^2})$$

$$c \approx 3 \cdot 10^8 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

$$m = 1 \frac{\text{eV}}{c^2}$$

$$m = \frac{1,6 \cdot 10^{-19} \text{ J}}{(3 \cdot 10^8 \frac{\text{m}}{\text{s}})^2}$$

$$m = \frac{1,6 \cdot 10^{-19} \frac{\text{kg} \cdot \text{m}^2}{\text{s}^2}}{9 \cdot 10^{16} \frac{\text{m}^2}{\text{s}^2}}$$

$$\underline{m \approx 1,8 \cdot 10^{-36} \text{ kg}}$$

Zu Kapitel 3. 2. 1: Berechnung der verschiedenen Massenvariablen

Die Sichtbare Masse:

Berechnung im Analyseprogramm:

```
objectsum = signal_jets[0].tlv() + signal_jets[1].tlv() +
signal_jets[2].tlv() + signal_jets[3].tlv() +
goodLeptons[0].tlv()
visibleMassZprime = objectsum.M()
```

Definition der Berechnung:

$$m_{vis}^2 \equiv M_{jet_{1,2,3,4} \ l}^2$$

$$m_{vis}^2 = (P_{jet_1}^\mu + P_{jet_2}^\mu + P_{jet_3}^\mu + P_{jet_4}^\mu + P_l^\mu)(P_{\mu \ jet_1} + P_{\mu \ jet_2} + P_{\mu \ jet_3} + P_{\mu \ jet_4} + P_{\mu \ l})$$

Die absolute Transversalmasse:

Berechnung im Analyseprogramm:

```
TransverseMassZprime =
math.sqrt(2*objectsum.Pt()*etmiss.tlv.Pt()*(1-
math.cos(objectsum.DeltaPhi(etmiss.tlv))))
```

Definition der Berechnung:

$$m_T^{tot\ 2} = (E_{T \ jet_1} + E_{T \ jet_2} + E_{T \ jet_3} + E_{T \ jet_4} + E_{T \ l} + E_T^{miss})^2 - (\vec{p}_{T \ jet_1} + \vec{p}_{T \ jet_2} + \vec{p}_{T \ jet_3} + \vec{p}_{T \ jet_4} + \vec{p}_{T \ l} + \vec{E}_T^{miss})^2$$

Die Transversalmasse mit Schrankencharakter

Berechnung im Analyseprogramm:

```
TransverseEnergy = (math.sqrt((objectsum.M()**2) +  
(objectsum.Pt()**2)) + etmiss.tlv.Pt())**2  
TransverseImpuls = ((objectsum + etmiss.tlv).Pt())**2  
ZprimeM1T = math.sqrt(TransverseEnergy - TransverseImpuls);
```

Definition der Berechnung:

$$m_{1T}^2 = \left(\sqrt{M_{jet_{1,2,3,4}l}^2 + \vec{p}_{1T}^2} + E_T^{miss} \right)^2 - (\vec{p}_{1T} + \vec{E}_T^{miss})^2$$

Sollten neben den Informationen zu den hier angesprochenen Massenvariablen noch weitere Erklärungen benötigt werden, haben Barr et al. eine Zusammenfassung vieler weiterer Massenvariablen erstellt (vgl. BARR et al. 2011). In den Arbeiten von Todt und Gräßler finden sich auch Erklärungen zu einigen Massenvariablen (vgl. TODT 2015 und GRÄßLER 2014).

Zu Kapitel 3. 2. 2: Bildschirmausschnitte, die Ergebnisse für $\frac{S}{\sqrt{B}}$ belegen

```
atlas@atlas-vm:~/ATLAS-DataAndTools$ python StatResult.py -c Configurations/PlotConf_ZPrimeAnalysis.py -s ZPrime1000  
Luminosity      = 1000.0  
=====
```

Signal:	
ZPrime1000	: 33.4
tot. Signal	= 33.4

```
=====
```

Backgrounds:	
Singletop	: 829.7
ttbar	: 13566.3
Diboson	: 25.1
SingleBoson	: 2362.3
tot. Background	= 16783.4

```
=====
```

S / B	= 0.001990 sigma
S / sqrt(B)	= 0.257773 sigma
S / sqrt(S + B)	= 0.257517 sigma

```
=====
```

atlas@atlas-vm:~/ATLAS-DataAndTools\$

Abb. 24: MET-Schwelle bei 30 GeV: $\frac{S}{\sqrt{B}} = 0,258 \sigma$

```

atlas@atlas-vm:~/ATLAS-DataAndTools$ python StatResult.py -c Configurations/PlotConf_ZPrimeAnalysis.py -s ZPrime1000
Luminosity      = 1000.0
=====
Signal:
-----
ZPrime1000      : 12.8
tot. Signal     = 12.8
=====
Backgrounds:
-----
Singletop       : 70.8
ttbar           : 1090.6
Diboson         : 2.2
SingleBoson     : 153.5
tot. Background = 1317.0
=====
S / B           = 0.009722 sigma
S / sqrt(B)     = 0.352808 sigma
S / sqrt(S + B) = 0.351106 sigma
=====
atlas@atlas-vm:~/ATLAS-DataAndTools$

```

Abb. 25: *MET*-Schwelle bei 140 GeV: $\frac{S}{\sqrt{B}} = 0,353 \sigma$

```

atlas@atlas-vm:~/ATLAS-DataAndTools$ python StatResult.py -c Configurations/PlotConf_ZPrimeAnalysis.py -s ZPrime1000
Luminosity      = 1000.0
=====
Signal:
-----
ZPrime1000      : 11.4
tot. Signal     = 11.4
=====
Backgrounds:
-----
Singletop       : 57.7
ttbar           : 855.0
Diboson         : 1.8
SingleBoson     : 126.1
tot. Background = 1040.5
=====
S / B           = 0.011001 sigma
S / sqrt(B)     = 0.354868 sigma
S / sqrt(S + B) = 0.352932 sigma
=====
atlas@atlas-vm:~/ATLAS-DataAndTools$

```

Abb. 26: *MET*-Schwelle bei 150 GeV: $\frac{S}{\sqrt{B}} = 0,355 \sigma$

```

atlas@atlas-vm:~/ATLAS-DataAndTools$ python StatResult.py -c Configurations/PlotConf_ZPrimeAnalysis.py -s ZPrime1000
Luminosity      = 1000.0
=====
Signal:
-----
ZPrime1000      : 10.2
tot. Signal     = 10.2
=====
Backgrounds:
-----
Singletop       : 47.0
ttbar           : 675.0
Diboson         : 1.5
SingleBoson     : 103.8
tot. Background = 827.3
=====
S / B           = 0.012293 sigma
S / sqrt(B)     = 0.353561 sigma
S / sqrt(S + B) = 0.351408 sigma
=====
atlas@atlas-vm:~/ATLAS-DataAndTools$

```

Abb. 27: *MET*-Schwelle bei 160 GeV: $\frac{S}{\sqrt{B}} = 0,354 \sigma$

Zu Kapitel 3. 2. 7: Bildschirmausschnitt, der Ergebnis von $\frac{S}{\sqrt{B}}$ belegt

```
atlas@atlas-vm:~/ATLAS-DataAndTools$ python StatResult.py -c Configurations/PlotConf_ZPrimeAnalysis.py -s ZPrime1000 -min 800 -max 1050 -o M1T
Luminosity      = 1000.0
Only counting events in interval [800.0, 1050.0]
=====
Signal:
-----
bins  9 11
ZPrime1000      :   7.4
tot. Signal     =   7.4
=====
Backgrounds:
-----
Singletop       :  17.8
ttbar           : 232.4
Diboson         :   0.7
SingleBoson     :  39.9
tot. Background = 290.8
=====
S / B           = 0.025538 sigma
S / sqrt(B)     = 0.435488 sigma
S / sqrt(S + B) = 0.430031 sigma
=====
atlas@atlas-vm:~/ATLAS-DataAndTools$
```

Abb. 28: Signifikanz für den Signalpeak im Diagramm der Transversalmasse mit Schrankencharakter

für das Massenfenster von 900 GeV bis 1100 GeV : $\frac{S}{\sqrt{B}} = 0,435\sigma$

Glossar

Hier im Glossar werden alle im Fließtext *kursiv* geschriebenen Wörter noch einmal erläutert.

- **ATLAS (A Torrodial LHC ApparatuS)**
... ein Detektor am Teilchenbeschleuniger *LHC*
- *b-jet*
... ein Jet (Hadronenhaufen), welcher aus der Produktion eines Bottom-Quarks stammt und daher den Kollisionspunkt noch ein paar Millimeter verlassen kann
- *b-tag*
... Selektionskriterium, das man aufgrund der Suche nach Bottom-Quarks bei einem Zerfall anwendet
- *C++*
... objektorientierte Programmiersprache, die in der Teilchenphysik aufgrund der schnell ausführbaren Programme gern angewendet wird
- **CERN (Conseil Européen pour la Recherche Nucléaire)**
... eine Forschungseinrichtung für Kern- und Teilchenphysik in Genf
- *Cut* bzw. *Eventcut*
... Selektionskriterium, das man anwendet, um die Daten von Interesse vom Untergrund zu trennen
- *Confinement*
... Phänomen, dass Teilchen mit Farbladung (wie z.B. Quarks) nicht isoliert bzw. frei existieren
- *Eichbosonen / Austauscheteilchen / Wechselwirkungsteilchen*
... Elementarteilchen, die die vier Grundkräfte (Elektromagnetismus, starke Kraft, schwache Kraft, Gravitation) vermitteln (Graviton jedoch nicht nachgewiesen)
- *Erweiterungen des SM (Beyond-Standard-Model-Theorien)*
... Theorien, die verwendet werden, um das *Standardmodell* zu erweitern, um auch bisher noch nicht erklärbare Beobachtungen zu begründen und so zukünftig noch bessere Voraussagen machen zu können
- *Leptonen*
... Klasse von Elementarteilchen, die zusammen mit den *Quarks* und den *Eichbosonen* die Elementarteilchen des *Standardmodells* bilden
- **LHC (Large Hadron Collider)**
... größter Teilchenbeschleuniger am *CERN* mit einem Umfang von rund 27 km

- *Missing energy in transverse plane (MET)*
... Energie, die vom Teilchendetektor nicht gemessen wurde, aber aufgrund der Energie- und Impulserhaltung erwartet wird und daher einem Neutrino zugeordnet wird
- *Partondichtefunktion (parton density function)*
... impulsabhängige Vorhersage der Zusammensetzung eines Protons
- *Python*
... interpretierte Programmiersprache mit einem knappen und gut lesbaren Programmierstil
- *Quarks*
... Elementarteilchen, aus denen Hadronen bestehen; unterliegen dem *Confinement*
- *ROOT*
... freie Software, die am *CERN* entwickelt wurde und zur Auswertung von Daten genutzt wird
- *ROOTbook*
... Datei, die einerseits aus Programmiercode und andererseits aus Textelementen besteht; zudem implementierte *ROOT*-Library zur besseren Datenanalyse; basierend auf Jupyter Notebooks
- *Schwache Isospin-Ladung*
... quantenmechanische Eigenschaft der Fermionen (*Quarks* und *Leptonen*)
- *Standardmodell der Teilchenphysik (SM)*
... fasst alle wesentlichen Erkenntnisse der Teilchenphysik zusammen und beschreibt alle bekannten Elementarteilchen und deren *Wechselwirkungen* untereinander
- *SWAN (Service for Web based ANalysis)*
... am *CERN* entwickelte Plattform zur interaktiven Datenanalyse über die Server am *CERN*
- *Virtuelle Maschine (VM)*
... Simulation bzw. Virtualisierung eines Computers auf einem anderen physisch existenten Rechner
- *Wechselwirkung/Kraft (fundamental)*
... sind Gravitation, Elektromagnetismus, schwache Wechselwirkung und starke Wechselwirkung

Abbildungsverzeichnis

- Abb. 1: Kobel, Michael et al.: *Teilchenphysik. Ladungen, Wechselwirkungen und Teilchen*. 1. Auflage. Hamburg 2017, Seite 13
unter:
http://www.leifiphysik.de/sites/default/files/medien/jhs_unterricht_nat_teilphys_270117digital.pdf
abgerufen am 8. April 2017 um 19:30 Uhr
- Abb. 2: Die Elementarteilchen des *Standardmodells*
unter:
https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Standard_Model_of_Elementary_Particles-de.svg
abgerufen am: 7. August 2017
- Abb. 3: Mouche, Philippe: *Overall view of the LHC*. Aus: CERN Document Server (vom 12. Juni 2014)
unter: <http://cds.cern.ch/record/1708847>
abgerufen am 29. November 2015 um 15:40 Uhr
- Abb. 4: Kobel, Michael et al.: *Teilchenphysik. Ladungen, Wechselwirkungen und Teilchen*. 1. Auflage. Hamburg 2017, Seite 11
unter:
http://www.leifiphysik.de/sites/default/files/medien/jhs_unterricht_nat_teilphys_270117digital.pdf
abgerufen am 8. April 2017 um 19:30 Uhr
- Abb. 5: Untersuchter Zerfallskanal des Z-prime-Bosons (eigenhändig mit dem Programm JaxoDraw am 21. April 2017 erstellt)
- Abb. 6: Aufbau der VM des ATLAS OpenData-Portals (eigenhändig erstellte Übersicht)
- Abb. 7 – 20: Diagramme, die eigenhändig mit der VM des ATLAS OpenData-Portals erstellt wurden

- Abb. 21: Eigenhändig mit dem Programm Microsoft Excel am 11. November 2017 erstelltes Diagramm
- Abb. 22: Eigens aufgenommener Bildschirmausschnitt eines eigens erstellten *ROOTbooks* am 20. November 2017
- Abb. 23: The ATLAS Collaboration: *Summary plots from the ATLAS Standard Model physics group*, 2017
unter:
<https://atlas.web.cern.ch/Atlas/GROUPS/PHYSICS/CombinedSummaryPlots/SM/>
abgerufen am: 15. November 2017 um 11:30 Uhr
- Abb. 24: Eigens aufgenommener Bildschirmausschnitt der statistischen Analyse der *MET*-Schwelle von 30 *GeV* am 10. September 2017 vom Terminal der VM
- Abb. 25: Eigens aufgenommener Bildschirmausschnitt der statistischen Analyse der *MET*-Schwelle von 140 *GeV* am 10. September 2017 vom Terminal der VM
- Abb. 26: Eigens aufgenommener Bildschirmausschnitt der statistischen Analyse der *MET*-Schwelle von 150 *GeV* am 10. September 2017 vom Terminal der VM
- Abb. 27: Eigens aufgenommener Bildschirmausschnitt der statistischen Analyse der *MET*-Schwelle von 160 *GeV* am 10. September 2017 vom Terminal der VM
- Abb. 28: Eigens aufgenommener Bildschirmausschnitt der statistischen Analyse des Massenfensters 900 *GeV* bis 1100 *GeV* des Diagramms der Transversalmasse mit Schrankencharakter am 15. Dezember 2017 vom Terminal der VM

Literaturverzeichnis

- Lemmer, Boris: *Bis(s) ins Innere des Protons. Ein Science Slam durch die Welt der Elementarteilchen, der Beschleuniger und Supernerds*. 1. Auflage (Springer Spektrum) Berlin, Heidelberg 2014
- Rößler, Wolfgang: *Eine kleine Nachtp Physik. Große Ideen und ihre Entdecker*. 8. Auflage (Rowohlt Taschenbuch Verlag) Hamburg 2014
- Patrignani, C. et al.: *Particle Physics Booklet*. 1. Auflage (Particle Data Group), Chinese Physics C, California 2016, 40(10): 100001

Internetquellen

- Bundesministerium für Bildung und Forschung (Hrsg.); Rütger, Melanie (Redaktionsleitung): *Large Hadron Collider (LHC) am CERN*
unter: <https://www.bmbf.de/de/large-hadron-collider-lhc-am-cern-1694.html>
abgerufen am: 7. August 2017 um 15 Uhr
- Punzi, Giovanni: *Sensitivity of searches for new signals and its optimization*, 2002
unter: <https://arxiv.org/pdf/physics/0308063v2.pdf>
abgerufen am: 22. August 2017 um 21:30 Uhr
- Langacker, Paul: *The Physics of Heavy Z' Gauge Bosons*, 2009
unter: <https://arxiv.org/pdf/0801.1345v3.pdf>
abgerufen am: 22. August 2017 um 21:30 Uhr
- Todt, Stefanie: *Investigation of mass reconstruction techniques for resonances in the scattering of $W^{\pm}W^{\pm} \rightarrow W^{\pm}W^{\pm}$ at the LHC*, 2015
unter: <https://cds.cern.ch/record/2000966?ln=en>
abgerufen am: 11. November 2017 um 14:30 Uhr
- Gräßler, Florian: *Optimierung der Signalsensitivität bei der Suche nach Z' -Bosonen mit dem ATLAS-Detektor*, 2014
unter: <https://iktp.tu-dresden.de/IKTP/pub/14/BachelorarbeitFlorianGraessler.pdf>
abgerufen am: 11. November 2017 um 14:30 Uhr
- Barr, A. J. et al.: *A storm in a “T” cup: the connoisseur’s guide to transverse projections and mass-constraining variables*, 2011
unter: <https://arxiv.org/pdf/1105.2977.pdf>
abgerufen am: 11. November 2017 um 16:30 Uhr

Selbstständigkeitserklärung

Ich versichere hiermit, dass ich diese Arbeit selbstständig angefertigt, nur die angegebenen Hilfsmittel verwendet und alle Stellen, die dem Wortlaut oder dem Sinn nach anderen Werken entnommen sind, durch Angabe der Quellen als Übernahmen kenntlich gemacht habe.

Diese Arbeit wurde in gleicher oder ähnlicher Form noch nicht als Prüfungsleistung eingereicht.

Radebeul, den 22. Dezember 2017

Tim Sebastian Hebenstreit