

Gymnasium Luisenstift Radebeul

Straße der Jugend 3

01445 Radebeul

Facharbeit (Komplexe Leistung)

Thema : Experimentelle Bestimmung der Massen von W^{+-} , W^- und Z^0 -Bosonen

Fach : Physik

Verfasser : Tim Sebastian Hebenstreit

Begleitlehrer : Herr Sven Eichler

Abgabetermin : 22. Februar 2016

Unterschrift des Begleitlehrers

Inhaltsverzeichnis

1. Einleitung	2
2. Theoretische Grundlagen.....	3
2.1 Die Masse in der Teilchenphysik.....	3
2.2 Die schwache Kraft und ihre Austauschteilchen	5
2.3 Die Protonenkollisionen im Teilchenbeschleuniger des CERN	6
3. Experimentelle Untersuchungen zur Masse der W^+ -, W^- - und Z^0 -Bosonen	9
3.1 Auswertung der Daten am CERN mittels Computerprogrammen	9
3.2 Schreiben eines Programms zur Bestimmung der Massen der Bosonen.....	10
3.3 Experimentelle Ergebnisse	12
4. Nachwort	15
5. Anhang.....	16
5.1 Quellen- und Literaturverzeichnis	16
5.2 Eigenanteil Programmcode	17
5.3 Selbstständigkeitserklärung	24

1. Einleitung

Sie, lieber Leser, werden sich doch bestimmt schon einmal eine dieser Fragen gestellt haben:

- Was hat es mit dem Urknall auf sich?
- Wie ist unsere Welt im Kleinsten aufgebaut?
- Was ist Radioaktivität?

Solche oder ähnliche Fragen habe ich mir auch schon seit langem gestellt und versucht Lösungen zu finden. Es ist die grundlegende Aufgabe der Physik diese zu beantworten, und es haben sich schon viele schlaue Menschen über solche Probleme den Kopf zerbrochen. Mit meiner Facharbeit möchte ich einigen dieser Fragen eine Antwort entlocken und meinen Wissensdrang versuchen ein wenig zu stillen.

Genauer soll es in der Facharbeit um W^+ -, W^- - und Z^0 - Bosonen gehen. Was diese sind und was es damit auf sich hat, erkläre ich im Laufe der Arbeit – so viel kann ich verraten: es sind Elementarteilchen, die für die Radioaktivität verantwortlich sind. Und bei Radioaktivität brauchen wir bloß an den Ausstieg aus der Kernenergie in Deutschland denken. Um aber zu begreifen, was denn so „gefährlich“ an Radioaktivität ist, muss man die Vorgänge im Kleinen verstehen. Da diese jedoch sehr komplex sind, werden wir uns vor allem mit der Eigenschaft der Masse dieser Teilchen auseinandersetzen – denn um diese geht es in meinem Eigenanteil.

Ich werde also in dieser Facharbeit die Massen aller drei Bosonen bestimmen, und zwar anhand der Daten der weltgrößten Maschine – dem LHC und seiner Detektoren. Es ist schon fast eine Ehre für mich, dies tun zu dürfen, denn für die Ergebnisse, die ich mir erhoffe, gab es vor rund 30 Jahren den Nobelpreis für Physik. Doch ohne die Hilfe von Herrn Dipl. Phys. Felix Socher wäre mir das alles nicht möglich, da er mir die notwendigen Daten zur Verfügung stellt und bei all meinen Fragen zur Stelle ist. Die genaue Auswertung werde ich auch im Weiteren erklären. Doch was soll denn bei meinen Messungen herauskommen? Meine Thesen sind:

1. Die Masse des W^+ - und W^- -Bosons beträgt $1,43 * 10^{-25} \text{ kg}$ (bzw. $80,4 \frac{\text{GeV}}{c^2}$).¹
2. Die Masse des Z^0 -Bosons beträgt $1,63 * 10^{-25} \text{ kg}$ (bzw. $91,2 \frac{\text{GeV}}{c^2}$).²

Letztendlich möchte ich dann diese erhofften Ergebnisse mit den Werten aus der Literatur vergleichen und somit meine hier aufgestellten Thesen verifizieren oder gegebenenfalls falsifizieren. Man kann also sagen, dass ich versuche die Ergebnisse vom CERN in Genf oder vom Fermilab in Illinois zu reproduzieren.

¹ Eidemüller, Dirk: *Präziseste Bestimmung der W-Boson-Masse*. Pro Physik (6. März 2012)
http://www.pro-physik.de/details/news/1501465/Praeziseste_Bestimmung_der_W-Boson-Masse.html
 abgerufen am 15. Oktober 2015 um 13:40 Uhr

² Olive, K.A. et al.: *Z MASS*. Particle Data Group (2014)
<http://www-pdg.lbl.gov/2015/listings/rpp2015-list-z-boson.pdf>
 abgerufen am 15. Oktober 2015 um 14:20 Uhr

2. Theoretische Grundlagen

2.1 Die Masse in der Teilchenphysik

Erst einmal muss man wissen, dass jedes Quantenobjekt in der Teilchenphysik eine Masse besitzt – doch was sind Quantenobjekte? Nun ja, da ein Mensch in den Größenordnungen, von denen wir hier reden, nicht mehr sehen kann, versucht der Physiker, sich diese Welt durch Modelle, also „Bilder, die nicht der Wirklichkeit entsprechen“ zu veranschaulichen. In dieser Welt sind Quantenobjekte also Objekte, aus denen das uns bekannte Atom aufgebaut ist, wie zum Beispiel Elektron e^- oder Proton p^+ , sowie jegliche Elementarteilchen (nach bisheriger Forschung unteilbare Strukturen).³ Diesen Objekten werden dann Eigenschaften zugeordnet, wie schon angesprochen zum Beispiel die Masse. Hinzu kommt der Spin und mehrere Ladungen – eine für die schwache, eine für die starke und eine für die elektromagnetische Wechselwirkung (soweit das Teilchen daran teilnimmt).

Zudem werden Sie wahrscheinlich an den Zahlen in meinen Thesen bemerkt haben, dass wir, wenn es um Elementarteilchen geht, über sehr, sehr kleine Massen reden. Normalerweise werden Massen in der Teilchenphysik in einer anderen Einheit angegeben und nicht in Gramm oder gar Kilogramm, nämlich in zum Beispiel $\frac{GeV}{c^2}$. Zugegebenermaßen sieht das interessant aus, doch diese Einheit lässt sich mithilfe Einsteins berühmter Formel $E = m * c^2$ aus der Einheit Kilogramm ableiten. Der einzige Grund, weswegen man diese Einheit und andere einführt, war die Praktikabilität. Niemand möchte so kleine und lange Zahlen aussprechen müssen wie in meinen Thesen. Deswegen leiten wir uns diese Einheit her, um ein Verständnis davon zu bekommen. Zuerst stellen wir Einsteins Formel nach der Masse um:

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

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

E	...	Energie
m	...	Masse
c	...	Vakuumlichtgeschwindigkeit

Man kann nun erkennen, dass die Masse dem Quotienten aus Energie und Quadrat der Lichtgeschwindigkeit entspricht. In der Ausgangsgleichung sieht man zudem, dass Energie gleich Masse multipliziert mit einer Konstante, der Vakuumlichtgeschwindigkeit, ist. Übrigens ließ sich erst anhand des Bewusstseins dieser Tatsache die Atombombe bauen, denn es heißt ja Energie ist Masse (mit einem Umrechnungsfaktor). Doch zurück zu unserer Einheit: In der Teilchenphysik gibt man Energien in Elektronenvolt an. „Ein Elektronenvolt ist die Energie,

³ Camejo, Silvia Arroyo: *Skurrile Quantenwelt* (Springer) 2006; S.3

die ein Elektron nach Durchlaufen einer Spannung von 1 Volt besitzt.“⁴ Der Vorsatz Giga vergrößert das Ganze dann noch um eine Milliarde.

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

Man sieht also nun, dass beides Einheiten der Masse sind. Natürlich ist 1 kg nicht gleich $1 \frac{eV}{c^2}$.

Wenn wir das zurückrechnen, können wir auch anhand der Einheit Joule statt Elektronenvolt bestens zeigen, dass es sich hier um Massen handelt. Dafür muss man wissen, dass

$1 eV \approx 1,6 * 10^{-19} J$ (auch $\frac{kg * m^2}{s^2}$) sind⁵ und dass die Vakuumlichtgeschwindigkeit

$c \approx 3 * 10^8 \frac{m}{s}$ beträgt.

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

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

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

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

Wir haben nun herausgefunden, dass 1 eV rund $1,8 * 10^{-36} kg$ entsprechen – also sehr wenig.

Die Teilchen, die ich genauer untersuchen werde, besitzen eine vorhergesagte Masse von $m_{W^+/W^-} = 1,43 * 10^{-25} kg$ und $m_{Z^0} = 1,63 * 10^{-25} kg$. Wenn man das in $\frac{GeV}{c^2}$ umrechnet,

heißt es nun: $m_{W^+/W^-} \approx 80,4 \frac{GeV}{c^2}$ und $m_{Z^0} \approx 91,2 \frac{GeV}{c^2}$. Wir merken also, dass das Z^0 -Boson

schwerer ist als das W^+ - und W^- -Boson. Damit es aber nun verständlicher wird, worum es sich bei diesen Teilchen handelt, setzen wir uns im nächsten Kapitel genauer mit ihnen auseinander.

⁴ Meyer, Prof. Dr. habil. Lothar; Schmidt, Dr. Gerd-Dietrich: *Basiswissen Schule Physik*. (Duden) 2011, S.244

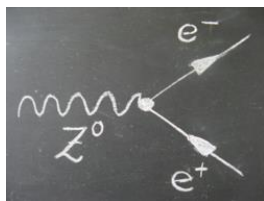
⁵ Meyer, Prof. Dr. habil. Lothar; Schmidt, Dr. Gerd-Dietrich: *Basiswissen Schule Physik*. (Duden) 2011, S.244

2.2 Die schwache Kraft und ihre Austauschteilchen

Wie schon oft angesprochen, versucht ein Physiker immer alles zu verstehen und so einfach wie nur möglich zu beschreiben. Zum Beispiel hat es sich eine Reihe von Physikern zur Aufgabe gemacht, alle bekannten Kräfte durch eine „Grundkraft“ zu erklären. Bisher war das noch nicht von vollem Erfolg gekürt, dennoch hat man es geschafft alle beobachtbaren Naturphänomene durch das Wirken von vier Grundkräften zu begründen. Zurzeit geht man davon aus, dass es genau diese vier Kräfte gibt. Anhand dieser lassen sich dann alle Vorgänge, die man beobachtet, erklären. Wenn man sich das einmal vor Augen hält, erscheint diese Leistung schier unglaublich, da all unser Dasein auf Kräften beruht. In der Teilchenphysik bezeichnet man Kräfte ebenfalls als Wechselwirkungen. Davon existieren folgende: die starke Kraft, die schwache Kraft, die elektromagnetische Kraft und die Gravitation. Jede dieser Kräfte wird durch ein sogenanntes Austauschteilchen vermittelt (das Austauschteilchen der Gravitation, das sei hier angemerkt, ist noch nicht nachgewiesen). Jedoch interessiert uns hier sehr die schwache Kraft, die durch W^+ -, W^- - und Z^0 -Bosonen vermittelt wird. Wie ich schon in der Einleitung vorwegnahm, ist die schwache Kraft verantwortlich für die Radioaktivität. Sie bedingt, dass sich ein Proton in ein Neutron umwandelt oder andersherum. Ein Antagonist zur starken Wechselwirkung ist sie aber nicht, auch wenn die Namensgebung täuscht. Darüber hinaus sorgt die starke Kraft dafür, den Atomkern zusammen zu halten. Das Auseinanderfallen eines Kerns, die Kernspaltung, funktioniert dadurch, dass die elektromagnetische Kraft den Kern auseinandertreiben will und die starke Kraft ihn hingegen zusammenhalten möchte. Was die schwache Kraft machen kann, ist, durch die Umwandlung eines Nukleons (Atomkernteilchen) dann das Gleichgewicht in die eine oder andere Richtung zu verändern. Wie wir wissen, besteht ein Atomkern aus Protonen und Neutronen. Die Protonen stoßen sich alle voneinander ab, da sie gleichnamig – nämlich positiv – geladen sind, weswegen wir eine Kraft benötigen, die das Ganze zusammen hält. Man kann sich das alles vorstellen wie Bonbons, die man angelutscht hat und aneinander drückt. Unser Speichel (die Starke Kraft) hält die Bonbons (Protonen und Neutronen) zusammen. Doch ab einer bestimmten Größe des „Bonbon-Pakets“ fällt dieses aufgrund seiner Größe in zwei kleinere auseinander (schwache Kraft und elektromagnetische Kraft). Ebenfalls bestens daran zu bemerken ist, dass die starke Kraft nur über sehr kurze Distanzen wirkt, dafür aber sehr stark ist (daher die Namensgebung). Hingegen wirkt die Schwache Kraft sehr schwach (auch wieder hier kommt daher der Name der Kraft), aber über größere Distanzen (wobei man sagen muss, dass diese Distanzen immer noch kleiner als der Atomkernradius sind).⁶ Meiner Meinung nach lässt sich dieses Thema trotz seiner Schwierigkeit und Unvorstellbarkeit dadurch

⁶ Staguhn, Gerhard: *Quarks, Atome, Moleküle. Auf der Jagd nach den kleinsten Bausteinen der Welt* (Anaconda) 2012

am besten erklären, sodass auch Kinder es begreifen können. Die W^+ -, W^- - und Z^0 -Bosonen vermitteln also die Kraft, die einen Atomkern zum Auseinanderfallen bringt. Wie Sie sicher schon bemerkt haben, gibt es vom W-Boson zwei Varianten: eine Plus- und eine Minus-Variante. Beide sind ein Teilchen an sich. Jedoch ist das eine zum anderen das Antiteilchen. Zu allen Teilchen der Materie um uns herum gibt es eine „entgegengesetzte“ Variante – die Antiteilchen. Trifft ein „normales“ Materieteilchen auf sein Antiteilchen, so „vernichten“ sie sich. Das heißt, dass aus der vorhandenen Energie ein Austauschteilchen entsteht. Umgekehrt kann auch aus einem Austauschteilchen ein Teilchen-Antiteilchen-Paar entstehen. Um das Ganze zu verdeutlichen, nutzt man sogenannte Feynman-Diagramme.



In diesem Diagramm kann man sehen, dass ein Z^0 -Boson, welches ein Austauschteilchen ist und anhand der Wellenlinie zu erkennen ist, in ein Elektron e^- und sein Antiteilchen, das Positron e^+ , zerfällt.

Abb. 1⁷

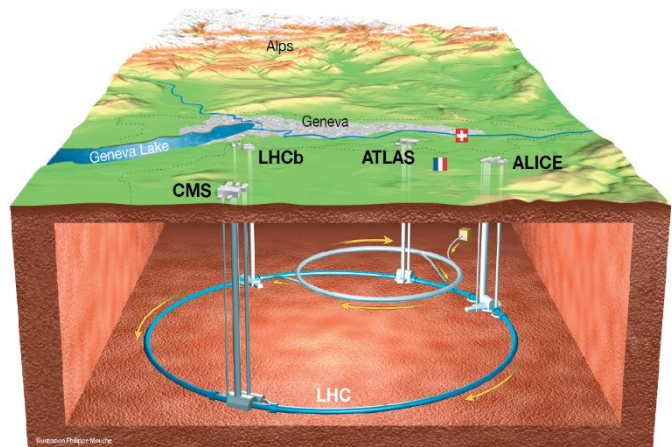
Es gibt mehrere Regeln, wie man ein solches Feynman-Diagramm zu erstellen hat – genauso wie es in der Mathematik Regeln gibt, nach denen man Formeln umstellt. Dadurch können Physiker schon vor ihren Experimenten Aussagen über die möglichen Ergebnisse treffen, weswegen auch diese Teilchen, bevor sie entdeckt wurden, vorhergesagt bzw. berechnet wurden. Im Folgenden wollen wir schauen, wie solche Experimente der Physiker aussehen. Dafür gehen wir an das CERN in Genf – die europäische Organisation für Kernforschung.

2.3 Die Protonenkollisionen im Teilchenbeschleuniger des CERN

Das CERN ist eine der teuersten Forschungseinrichtungen und die weltgrößte für Teilchenphysiker. Dort werden Protonen anhand von Magnetfeldern in kreisrunden Tunneln beschleunigt und dann im größten, dem Large Hadron Collider, aufeinander geschossen. Der Tunnel des LHC ist 27 km lang und liegt 100 m unter der Erde. Der Querschnitt eines Rohres, in dem die Protonen entlang fliegen, ist nicht größer als eine Hand. Die Magneten des LHC sind dauerhaft auf ca. -270 °C (3 K) herunter gekühlt, damit sie supraleitend sind und die benötigten starken Magnetfelder erzeugen können. Es erscheint logisch, dass ein geladenes Teilchen – in unserem Fall ein Proton – nicht freiwillig auf einer Kreisbahn weiterfliegt, nachdem man es beschleunigt hat, weswegen es ständig durch die Magnetfelder abgelenkt werden muss, damit es auf seiner Bahn bleibt. Jedoch verliert das Teilchen dadurch auch

⁷ Kobel, Michael et al.: *Das W-Teilchen. Untergrundereignisse.*
http://atlas.physicsmasterclasses.org/de/wpath_lhcphysics2.htm
 abgerufen am 23. Oktober 2015 um 17:10 Uhr

wiederum an kinetischer Energie. Die Lösung: Das Teilchen wird immer wieder in dafür ausgelegten Teilabschnitten des LHC weiter beschleunigt und da es sich in einem Kreis befindet, kann dies auch gewährleistet werden. So wird das Proton im LHC auf annähernd Lichtgeschwindigkeit gebracht, wobei es pro Sekunde rund 11.000 Mal den Tunnel von 27 km Länge durchfliegt. Damit man bei einer Teilchenkollision möglichst hohe Energien erzeugt, lässt man die Teilchen, die aufeinander treffen sollen, entgegengesetzt zueinander im LHC kreisen. Somit addieren sich die kinetischen Energien und es können Teilchen mit einer größeren Masse – wie zum Beispiel unser Z^0 -Boson – entstehen, da, wie wir ja bereits wissen, Energie so etwas wie Masse ist. Sobald nun die Kollisionspartner die richtige Geschwindigkeit besitzen, lässt man sie in einem Tunnelabschnitt kollidieren, an dem sich ein Detektor befindet. Dieser macht dann von der Kollision ein „Foto“, welches sich die Teilchenphysiker im Nachhinein anschauen. Daraus können sie dann Schlussfolgerungen über die Wechselwirkungen im Inneren anhand ihrer Modelle ziehen.

Abb. 2⁸

Das CERN mit seinem Teilchenbeschleuniger – dem LHC – ist weltweit die modernste und größte Forschungseinrichtung zur Erforschung des Mikrokosmos und seiner Strukturen. Wie im Bild zu erkennen ist, liegt das CERN in Frankreich und der Schweiz. Auf diesem Gebiet gelten Sonderrechte, sodass keinem der beiden Länder das CERN „gehört“. Beispielsweise darf dort keine Polizei eingesetzt werden. Selbst bei den Generalversammlungen der Vereinten Nationen hat die Forschungseinrichtung das Recht ihre Meinung zu sagen, um der Wissenschaft eine starke Stimme zu verleihen.⁹ Die Europäische Organisation für Kernforschung gibt es seit 1954 – kurz nach dem Zweiten Weltkrieg, als eine Kommunikation hinweg über politische Barrieren wichtig war. Seitdem gab es viele verschiedene Chefs. Einer von ihnen war der Italiener Carlo Rubbia. Er bekam 1984 „für seine entscheidenden Beiträge zum großen Projekt, das zur Entdeckung der Feldpartikel W und Z (Kommunikatoren der schwachen Wechselwirkung) geführt hat“¹⁰, den Nobelpreis für Physik. Die Ergebnisse, für die er seinen Nobelpreis verlie-

⁸ Mouche, Philippe: *Overall view of the LHC*. CERN Document Server (12. Juni 2014)
<http://cds.cern.ch/record/1708847> abgerufen am 29. November 2015 um 15:40 Uhr

⁹ Lemmer, Boris: *Bis(s) ins Innere des Protons. Ein Science Slam durch die Welt der Elementarteilchen, der Beschleuniger und Supernerds* (Springer Spektrum) 2014, S. 9

¹⁰ Nobel Media AB: *The Nobel Prize in Physics 1984*. Nobelprize.org (2014)
http://www.nobelprize.org/nobel_prizes/physics/laureates/1984/
 abgerufen am 29. November 2015 um 17 Uhr

hen bekam, versuche ich später in meinem praktischen Teil mit der Hilfe Felix Sochers zu reproduzieren. Doch wie werde ich dies anstellen? Wir wissen inzwischen, dass der Detektor von den Teilchenkollisionen Bilder macht. Er macht also viele verschiedene Messungen zur gleichen Zeit, die dann im Nachhinein zu einer geschlossenen Darstellung des Ereignisses zusammengefügt werden. Im nächsten Kapitel schauen wir uns solche „Fotos“ genauer an und erfahren, wie sie ausgewertet werden. Ich kann nur schon im Vorhinein verraten, dass sich dies schwierig gestaltet, da die Teilchen, die ich untersuche, sehr kurz „leben“. Das heißt man sieht sie letztendlich nur anhand ihrer Zerfallsprodukte.

3. Experimentelle Untersuchungen zur Masse der W^+ -, W^- und Z^0 -Bosonen

3.1 Auswertung der Daten am CERN mittels Computerprogrammen

Direkt nachdem eine Kollision im ATLAS-Detektor stattgefunden hat, werden die Daten an das Rechenzentrum des CERN weitergeleitet, wo dann eine „Auslese“ erfolgt, da viele der Ereignisse (engl. Events) uninteressant für die Forscher sind. Diese erste Aussortierung erfolgt durch Computerprogramme. Nachdem die Physiker ausreichend Daten gesammelt haben, um ihre anschließenden Ergebnisse repräsentativ zu machen, werten sie möglichst viele Ereignisse aus. In Abb. 3 unten wird ein solches Ereignis durch das Programm Atlantis dargestellt.

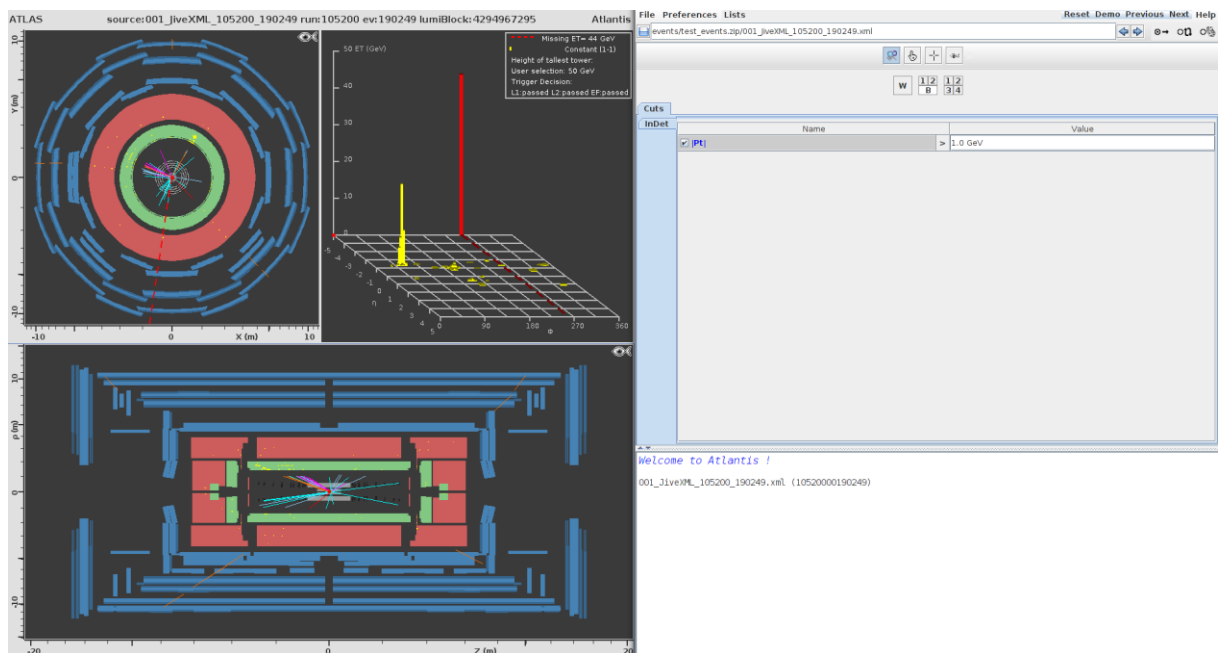


Abb. 3¹¹

In der linken Hälfte sieht man die Kollision im Detektor visuell. Rechts kann man Einstellungen tätigen, um sich zum Beispiel nur Teilchen mit einer bestimmten Energie anzeigen zu lassen. In den grün, rot oder blau unterlegten „Schalen“ des Detektors werden jeweils unterschiedliche Teilchen gemessen. Im elektromagnetischen Kalorimeter – der grünen Schale – findet beispielsweise vor allem die Detektion von Elektronen und Positronen statt. Zudem herrscht im Detektor ein magnetisches Feld, wodurch geladene Teilchen anhand der Lorentzkraft abgelenkt werden. Je nach Richtung weiß man dann, ob das Teilchen positiv oder negativ geladen war. Der Grund für diese viele Arbeit, die sich die Teilchenphysiker machen, ist, dass die für sie „interessanten“ Teilchen (wie W^+ -, W^- und Z^0 -Bosonen) so kurz leben, sodass sie schon im Kollisionspunkt wieder zerfallen. Wie schon angesprochen ist es dann die Aufgabe des Physikers, die entscheidenden Zerfallsprodukte auszumachen, um anschließend auf das richtige „Anfangsteilchen“ zu schließen. Im folgenden Kapitel lesen Sie, wie ich bei den W^+ -, W^- und Z^0 -Bosonen vorgeh.

¹¹ Bildschirmfoto eines sog. Events von Atlantis

3.2 Schreiben eines Programms zur Bestimmung der Massen der Bosonen

In meinem Eigenanteil ging es darum, ein Programm zur Auswertung der Daten selbst zu schreiben. Die Physiker am CERN nutzen dafür die Programmiersprache Python. Diese in der kurzen Zeit zu lernen, ist nicht möglich, da das verwendete Analyseprogramm schon rund 200 Kommandozeilen lang ist. Um ein solches Programm fehlerfrei zu schreiben, benötigt man langjährige Programmiererfahrung. Im Vorfeld habe ich ein Tutorial zur Sprache durchgearbeitet, wodurch ich deren Grundlagen kennen lernte. Mein Betreuer Felix Socher hat mir dann anschließend ein Programmgerüst zur Verfügung gestellt. In diesem waren die entscheidenden Kommandozeilen herausgelöscht, sodass ich diese selbst neu schreiben musste. In Abb. 4 und 5 sehen Sie die von mir geschriebenen Zeilen. Zudem folgt noch ein Bild (Abb. 6) meines Arbeitsplatzes während meiner praktischen Versuchstage.

```

# tim
# Cut 1, cut on etmiss
if(etmiss.Et < 20.0): return False

#filters leptons, only leptons with pt > 20 GeV remain
HighPtLeptons = [lepton for lepton in leptons if lepton.Track.Pt > 20]
HighPtLeptons = [lepton for lepton in HighPtLeptons if lepton.Track.IsoPt/lepton.Track.Pt < 0.2]
if(len(HighPtLeptons) != 1): return False

# check if W-
leadingLepton = leptons[0]
# if leadingLepton.Track.Charge > 0: return False

# Cuts on number of jets
if sum(1 for jet in jets if jet.Et > 25) > 1: return False

#Fill Histogram
wtmass = TransverseMassW(leadingLepton.Track.Pt, leadingLepton.Track.Phi, etmiss.Et, etmiss.Phi)
self.WtMass.Fill(wtmass)

self.WtMassSum += wtmass
self.WtMass2Sum += wtmass**2
self.acceptedEventsCounter += 1

return True

def finalize(self):
def meandeviation(sumx2, sumx, N):
    return math.sqrt(1.0/N**2 * (sumx2 - sumx**2/N))

print ""
print "Number of analyzed events " + str(self.preSelectionCounter)
print "Number of accepted Events " + str(self.acceptedEventsCounter)
print "Mean Wt mass = " + str(self.WtMassSum/self.acceptedEventsCounter)
print "Uncertainty on mean = " + str(meandeviation(self.WtMass2Sum, self.WtMassSum, self.acceptedEventsCounter))

self.WtMass.Draw()

```

Abb. 4¹²

¹² Bildschirmfoto eines Ausschnittes des Analyseprogramms für die W^+ - und W^- -Bosonen

```

#tim
#filters leptons, only leptons with pt > 10 GeV remain
HighPtLeptons = [lepton for lepton in leptons if lepton.Track.Pt > 10]
HighPtLeptons = [lepton for lepton in HighPtLeptons if lepton.Track.IsoPt/lepton.Track.Pt < 0.2]
if(len(HighPtLeptons) != 2): return False
leadLepton = HighPtLeptons[0]
trailLepton = HighPtLeptons[1]

#cut on transverse momentum of leptons
if leadLepton.Track.Pt < 20: return False
if trailLepton.Track.Pt < 10: return False

# check that leptons are charged oppositely
if leadLepton.Track.Charge * trailLepton.Track.Charge >= 0: return False

# check that leptons have same type (electrons and positron pair or muon antimuon pair)
if leadLepton.__class__ != trailLepton.__class__: return False

# Cuts on number of jets
if sum(1 for jet in jets if jet.Et > 25) > 1: return False

mass2 = 2*leadLepton.Track.Pt*trailLepton.Track.Pt*(math.cosh(leadLepton.Track.Eta - trailLepton.Track.Eta) - math.cos(leadLe
self.invMass.Fill(math.sqrt(mass2))

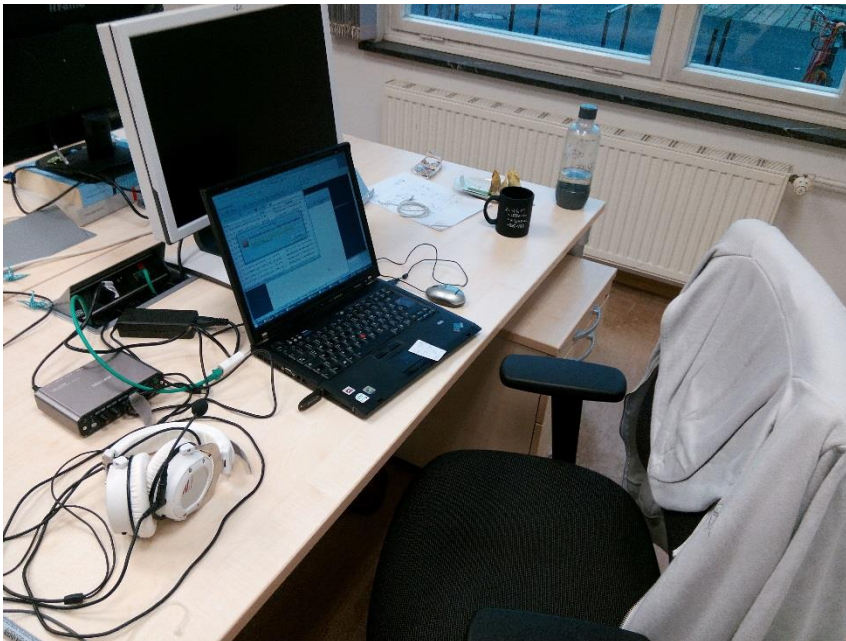
self.ZmassSum += math.sqrt(mass2)
self.Zmass2Sum += mass2
self.acceptedEventsCounter += 1
return True

def finalize(self):
def meandeviation(sumx2, sumx, N):
    return math.sqrt(1.0/N**2 * (sumx2 - sumx**2/N))

print ""
print "Number of analyzed events " + str(self.preSelectionCounter)
print "Number of accepted Events " + str(self.acceptedEventsCounter)
print "Mean Z mass = " + str(self.ZmassSum/self.acceptedEventsCounter)
print "Uncertainty on mean = " + str(meandeviation(self.Zmass2Sum, self.ZmassSum, self.acceptedEventsCounter))

self.invMass.Draw()

```

Abb. 5¹³Abb. 6¹⁴

Um den physikalischen Hintergrund zu verstehen, möchte ich an dieser Stelle noch einiges erklären. Die Zerfälle eines Teilchens laufen alle nach einem bestimmten Muster ab. Die Zerfallsprodukte werden beispielsweise in einem bestimmten Winkel vom Zerfallspunkt (auch Kollisionspunkt der Protonen, da die Teilchen fast zeitgleich wieder zerfallen) abgestrahlt. Des Weiteren besitzen die Zerfallsprodukte aufgrund der Ladungserhaltung bestimmte Ladungen. Hinzu kommen noch weitere Parameter, die einen Zerfall charakterisieren. Meistens kann die

¹³ Bildschirmfoto eines Ausschnittes des Analyseprogramms für die Z^0 -Bosonen

¹⁴ Selbst aufgenommenes Foto meines Arbeitsplatzes

Zerfallsreaktion anhand der Messwerte einem bestimmten Teilchen zugeordnet werden. Letztendlich laufen diese Reaktionen immer nach bestimmten Regeln ab. Die zuvor genannten Parameter berechnen die Physiker mithilfe anderer Erkenntnisse vor dem Durchführen der Experimente. Es ist so, dass bei der Kollision von zwei Protonen nicht vorhergesagt werden kann, was passieren wird. Man kann nur bestimmte Wahrscheinlichkeiten angeben, dass dies oder jenes geschieht. Dabei muss man sich noch einmal vor Augen führen, dass selbst bei einem bestens analysierten Event keine vollkommene Sicherheit besteht, dass wirklich das passiert ist, was man herausgefunden hat, denn schließlich konnten wir nicht selbst dabei zusehen. Es kann also durchaus sein, dass in Zukunft unser bisheriges Bild des Mikrokosmos noch einmal grundlegend verändert wird. Wir dürfen deshalb ganz gespannt auf wissenschaftliche Neuerungen sein und auf das, was uns erwartet.

3.3 Experimentelle Ergebnisse

Das Programm ist nun geschrieben. Jetzt muss es im Terminal von Linux gestartet werden. Für die Auswertung hatte mir Felix Socher Daten von 12.000 Events im ATLAS-Detektor gegeben, damit meine Ergebnisse repräsentativ werden. Das Analyseprogramm lief anschließend über den Datensatz und schrieb nebenbei die ermittelten Zahlen in ein Diagramm, was Felix so programmiert hatte. Zudem berechnete es die exakt ermittelte Masse, sowie deren Abweichung. In den Abbildungen unten sieht man die Ergebnisse.

Ergebnisse des W^+ -, und W^- -Bosons

```
Number of analyzed events 12000
Number of accepted Events 3404
Mean Wt mass = 47.9997498352
Uncertainty on mean = 0.471769415897
```

Abb. 7¹⁵

Ergebnisse des Z^0 -Bosons

```
Number of analyzed events 12000
Number of accepted Events 1000
Mean Z mass = 90.8865978019
Uncertainty on mean = 0.126410056693
```

Abb. 8¹⁶

Das Programm zeigt in der obersten Zeile an, wie viele Ereignisse analysiert wurden. Darunter steht die Anzahl der akzeptierten Events. Die folgenden Zahlen geben die ermittelte Masse und Abweichung in $\frac{GeV}{c^2}$ an. Nur beim W-Boson gab es eine Schwierigkeit. Und zwar konnten bei der Analyse dieser Teilchen nicht alle unbrauchbaren Ereignisse aussortiert werden, da die Eigenschaften mancher Zerfälle sehr ähnlich sind. Es ist also zum Beispiel noch sogenannter Untergrund in den ausgewerteten Daten. Denn wie man sieht, stimmt die ausgegebene Masse von rund $48 \frac{GeV}{c^2}$ mit der Masse in den Thesen von $m_{W^+/W^-} \approx 80,4 \frac{GeV}{c^2}$ nicht überein. Leider konnte ich deswegen meine erste These („Die Masse des W^+ - und W^- -Bosons beträgt $1,43 \cdot 10^{-25} kg$ (bzw. $80,4 \frac{GeV}{c^2}$).“ s.o.) nicht belegen. An der Experimentieranordnung bzw. dem

¹⁵ Bildschirmfoto der im Terminal ausgegebenen Werte zu den W^+ - und W^- -Bosonen

¹⁶ Bildschirmfoto der im Terminal ausgegebenen Werte zu den Z^0 -Bosonen

Messgerät, dem ATLAS-Detektor, kann es nicht gelegen haben, da dieser bezüglich der Masse des W^+ - und W^- -Bosons gleiche Ergebnisse wie zum Beispiel der CMS-Detektor geliefert hat. Zudem haben die Physiker aufgrund der physikalischen Bauteile die Messungenauigkeit des Detektors berechnen können. Dementsprechend sind jegliche Fehlerquellen beim Experimentator zu suchen, das heißt, dass zum Beispiel das Auswertungsprogramm noch nicht ausgefeilt genug war. Beim Vergleich der beiden Diagramme unten erkennt man noch einmal sehr gut, dass in meiner Messung bei kleinen Massen noch zu viele Events gezählt werden.

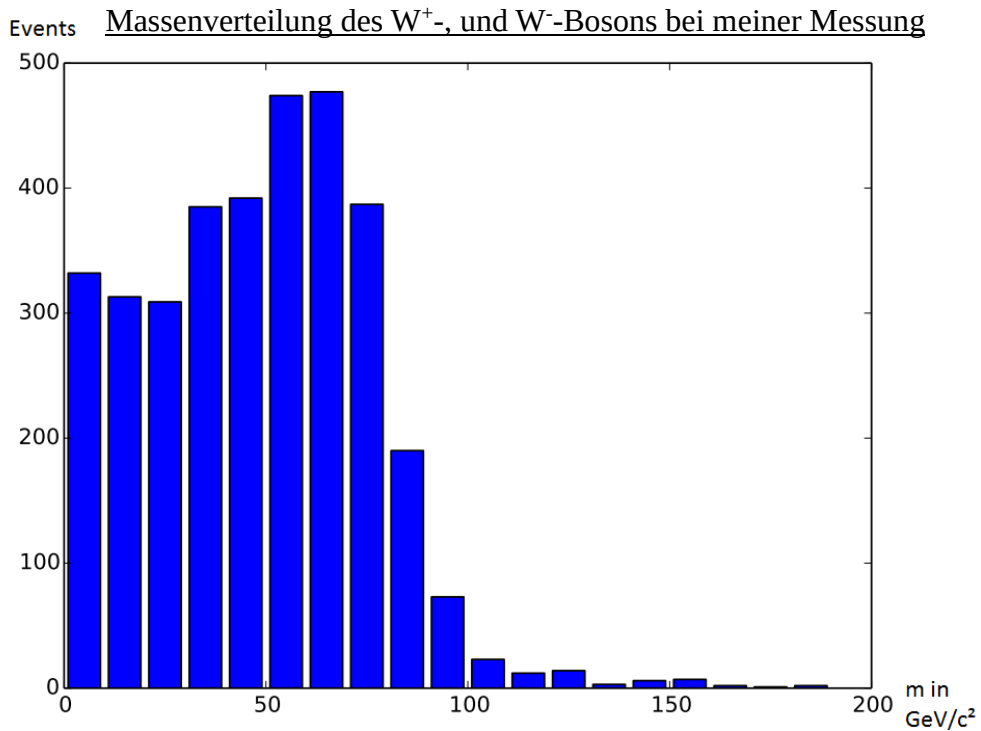


Abb. 9

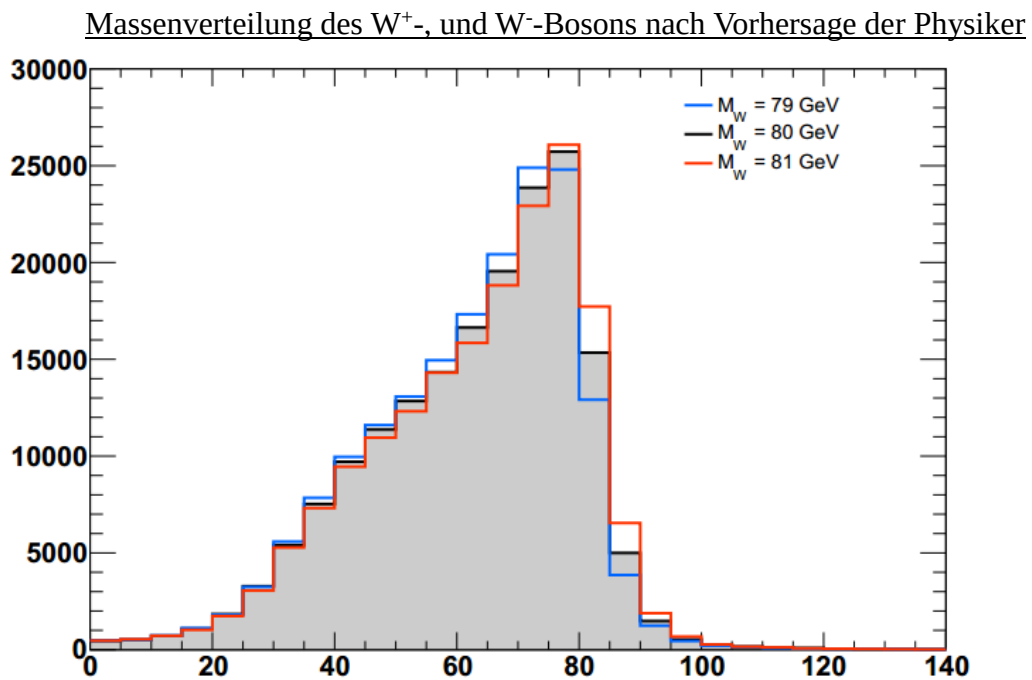


Abb. 10

In den beiden Diagrammen ist die Anzahl von Ereignissen in Abhängigkeit von Masse dargestellt. Das untere zeigt eine berechnete Vorhersage der Physiker bei verschiedenen Massen des W^+ - und W^- -Bosons. Wäre bei meiner Messung etwas Besseres herausgekommen, so hätte ich das resultierende Diagramm mit dem Obigen abgleichen müssen, um letztendlich die korrekte Masse zu erhalten.

Hingegen funktionierte die Massenbestimmung beim Z^0 -Boson einwandfrei. Die vom Programm ausgegebene Masse stimmte mit der vorhergesagten fast exakt überein, $90,9 \frac{GeV}{c^2} \approx 91,2 \frac{GeV}{c^2}$. Die Abweichung des Messwertes von der Vorhersage ist dabei rund 0,3%. Damit konnte ich meine zweite These („Die Masse des Z^0 -Bosons beträgt $1,63 \cdot 10^{-25} kg$ (bzw. $91,2 \frac{GeV}{c^2}$).“ s.o.) belegen. Auch im dazugehörigen Diagramm sieht man eine fast ideale Gaußsche Glockenkurve.

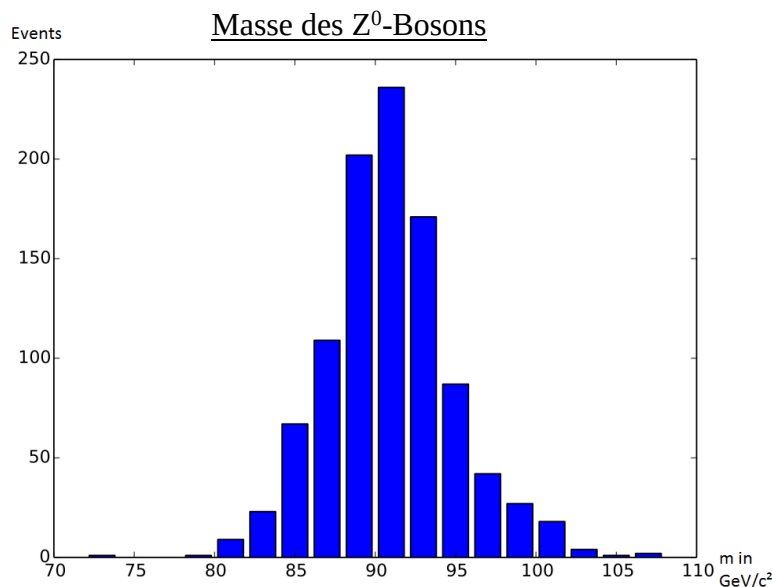


Abb. 11

Hiermit wäre ich nun fast am Ende meiner Facharbeit. Die erhofften Ergebnisse sind größtenteils herausgekommen. Dies stellt mich sehr zufrieden, da die Erkenntnisse noch relativ jung sind. Im Anschluss können sie noch mein Nachwort zu dieser Arbeit lesen.

4. Nachwort

Nachdem ich nun meine erste wissenschaftliche Arbeit fertig gestellt habe, fällt mir ein großer Stein vom Herzen, da ich auch wirklich stolz auf das Ergebnis bin. Viel Arbeit habe ich investiert, um dieses Ergebnis zu erzielen. Doch dies wäre mir ohne die Unterstützung von Felix Socher und meiner Freundin Sophie Tengler nicht möglich gewesen. Felix opferte seine Arbeitszeit und half mir beim Schreiben des Analyseprogramms, er kontrollierte die Arbeit auf fachliche Richtigkeit, gab immer wieder Tipps und Verbesserungsvorschläge und motivierte mich auch weiter zu machen. Ohne ihn wäre diese Facharbeit nicht möglich gewesen, weswegen ich ihm besonders danken möchte. Sophie half mir bei der Formulierung von schwierigen Sachverhalten und spornte mich ebenfalls sehr an mit größter Mühe zu arbeiten. Auch sei Uta Bilow, meine Betreuerin am Institut für Kern- und Teilchenphysik an der Technischen Universität Dresden, nicht unerwähnt, da sie mir vorschlug so etwas zu machen. Meine Eltern und mein kleiner Bruder Nick lasen auch ab und zu Leseproben, die ich ihnen zur Verbesserung gab. Es freut mich riesig, dass mir in der Schule einmal die Möglichkeit gegeben wurde, ein Thema zu bearbeiten, welches mich selber sehr interessiert. Natürlich spricht das Thema nicht jedermann an, aber man spürt hoffentlich meine Ambition für die Teilchenphysik. Zum Beispiel habe ich mich schon in Vorbereitung auf meine Verteidigung dieser Arbeit an einem einwöchigen CERN-Workshop angemeldet, an dem ich im April in Genf teilnehmen werde. Jedenfalls hoffe ich, dass ich Sie, lieber Leser, auch ein wenig von meiner Faszination begeistern konnte.

5. Anhang

5.1 Quellen- und Literaturverzeichnis

Bücher

- [1] Camejo, Silvia Arroyo: *Skurrile Quantenwelt* (Springer) 2006
- [2] Lemmer, Boris: *Bis(s) ins Innere des Protons. Ein Science Slam durch die Welt der Elementarteilchen, der Beschleuniger und Supernerds* (Springer Spektrum) 2014
- [3] Meyer, Prof. Dr. habil. Lothar; Schmidt, Dr. Gerd-Dietrich: *Basiswissen Schule Physik*. (Duden) 2011
- [4] Staguhn, Gerhard: *Quarks, Atome, Moleküle. Auf der Jagd nach den kleinsten Bausteinen der Welt* (Anaconda) 2012

Internetquellen

- [5] Eidemüller, Dirk: *Präziseste Bestimmung der W-Boson-Masse*. Aus: Pro Physik (6. März 2012)
unter: http://www.pro-physik.de/details/news/1501465/Praeziseste_Bestimmung_der_W-Boson-Masse.html
abgerufen am 15. Oktober 2015 um 13:40 Uhr
- [6] Nobel Media AB: *The Nobel Prize in Physics 1984*. Aus: Nobelprize.org (2014)
unter: http://www.nobelprize.org/nobel_prizes/physics/laureates/1984/
abgerufen am 29. November 2015 um 17 Uhr
- [7] Olive, K.A. et al.: *Z MASS*. Aus: Particle Data Group (2014)
unter: <http://www-pdg.lbl.gov/2015/listings/rpp2015-list-z-boson.pdf>
abgerufen am 15. Oktober 2015 um 14:20 Uhr

Bildquellen

- Abb. 1 Kobel, Michael et al.: *Das W-Teilchen. Untergrundereignisse*.
unter: http://atlas.physicsmasterclasses.org/de/wpath_lhcphysics2.htm
abgerufen am 23. Oktober 2015 um 17:10 Uhr
- Abb. 2 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

5.2 Eigenanteil Programmcode

Analysis.py

```

import Histogram as hist
import XMLReader as reader
from Particles import *
import Definitions as Defs
import math

def DeltaPhi(phi1, phi2):
    dPhi = abs(phi1 - phi2)
    dPhi = 2*math.pi - dPhi if dPhi > math.pi else dPhi
    return dPhi

def TransverseMassW(lep_pt, lep_phi, etmiss_pt, etmiss_phi):
    return math.sqrt(2 * lep_pt * etmiss_pt * (1 - math.cos(DeltaPhi(lep_phi, etmiss_phi))));

def makeDir(name):
    if(not os.path.exists(name)):
        os.makedirs(name)

#=====

class Analysis(object):
    """Baseclass for all analyses. Common functionality should go here"""
    def __init__(self, store):
        super(Analysis, self).__init__()
        self.Store = store

    def initialize(self):
        pass

    def analyze(self):
        pass

    def finalize(self):
        print ""

#=====

class SingleWAnalysis(Analysis):
    """docstring for SingleWAnalysis"""
    def __init__(self, store):
        super(SingleWAnalysis, self).__init__(store)
    def initialize(self):
        self.WtMass = hist.histogram("WtMass", "WtMass", 0,200,10)
        self.preSelectionCounter = 0
        self.acceptedEventsCounter = 0
        #self.W+Counter = 0
        #self.W-Counter = 0

```

```

self.WtMassSum = 0
self.WtMass2Sum = 0

def analyze(self):
    self.preSelectionCounter += 1

    # retrieving objects
    jets = self.Store.getJets()
    electrons = self.Store.getElectrons()
    muons = self.Store.getMuons()
    etmiss = self.Store.getEtMiss()
    leptons = muons + electrons
    leptons = [lepton for lepton in leptons if lepton.Track != None]
    leptons = sorted(leptons, key=lambda lepton: lepton.Track.Pt, reverse=True)

    # tim
    # Cut 1, cut on etmiss
    if(etmiss.Et < 20.0): return False

    #filters leptons, only leptons with pt > 20 GeV remain
    HighPtLeptons = [lepton for lepton in leptons if lepton.Track.Pt > 20]
    HighPtLeptons = [lepton for lepton in HighPtLeptons if lepton.Track.IsoPt/lep-
ton.Track.Pt < 0.2]
    if(len(HighPtLeptons) != 1): return False

    # check if W-
    leadingLepton = leptons[0]
    # if leadingLepton.Track.Charge > 0: return False

    # Cuts on number of jets
    if sum(1 for jet in jets if jet.Et > 25) > 1: return False

    #Fill Histogram
    wtmass = TransverseMassW(leadingLepton.Track.Pt, leadingLepton.Track.Phi,
etmiss.Et, etmiss.Phi)
    self.WtMass.Fill(wtmass)

    self.WtMassSum += wtmass
    self.WtMass2Sum += wtmass**2
    self.acceptedEventsCounter += 1

    return True
def finalize(self):
    def meandeviation(sumx2, sumx, N):
    return math.sqrt(1.0/N**2 * (sumx2 - sumx**2/N))

    print ""
    print "Number of analyzed events " + str(self.preSelectionCounter)
    print "Number of accepted Events " + str(self.acceptedEventsCounter)
    print "Mean Wt mass = " + str(self.WtMassSum/self.acceptedEventsCounter)
    print "Uncertainty on mean = " + str(meandeviation(self.WtMass2Sum, self.WtMas-
sSum, self.acceptedEventsCounter))

```

```
self.WtMass.Draw()
```

```
#-----
```

```
class WWAnalysis(Analysis):
    """docstring for WWAnalysis"""
    def __init__(self, store):
        super(WWAnalysis, self).__init__(store)
    def initialize(self):
        self.dPhiLL = hist.histogram("DeltaPhiLL", "DeltaPhiLL", 0,180,15)
    def analyze(self):
        # retrieving objects
        jets = self.Store.getJets()
        electrons = self.Store.getElectrons()
        muons = self.Store.getMuons()
        etmiss = self.Store.getEtMiss()

        # cleaning leptons
        leptons = muons + electrons
        leptons = [lepton for lepton in leptons if lepton.Track != None]
        leptons = sorted(leptons, key=lambda lepton: lepton.Track.Pt,reverse=True)

        if len(leptons) == 0: return False

        # Cuts on number of jets
        if sum(1 for jet in jets if jet.Et > 25) > 1: return False
        # cuts on etmiss
        if(etmiss.Et < 20.0): return False

        #filters leptons, only leptons with pt > 10 GeV remain
        HighPtLeptons = [lepton for lepton in leptons if lepton.Track.Pt > 10]

        # check number of leptons
        if(len(HighPtLeptons) != 2): return False

        #assign leadlepton and traillepton
        leadLepton = leptons[0]
        trailLepton = leptons[1]

        #cut on transverse momentum of leptons
        if leadLepton.Track.Pt < 20: return False
        if trailLepton.Track.Pt < 10: return False

        # check that leptons are charged oppositely
        if leadLepton.Track.Charge * trailLepton.Track.Charge > 0: return False

        # check that leptons have same type (electrons and positron pair or muon antimuon pair)
        if leadLepton.__class__ == trailLepton.__class__ and etmiss.Et < 40: return False

        self.dPhiLL.Fill(DeltaPhi(leadLepton.Track.Phi, trailLepton.Track.Phi)/math.pi*180)
        return True
```

```

def finalize(self):
    pass
    self.dPhiLL.Draw()

#=====

class ZAnalysis(Analysis):
    """docstring for ZAnalysis"""
    def __init__(self, store):
        super(ZAnalysis, self).__init__(store)
    def initialize(self):
        self.invMass = hist.histogram("invMass", "invMass", 0,200,2)
        self.preSelectionCounter = 0
        self.acceptedEventsCounter = 0
        self.ZmassSum = 0
        self.Zmass2Sum = 0
    def analyze(self):
        self.preSelectionCounter += 1

        # retrieving objects
        jets = self.Store.getJets()
        electrons = self.Store.getElectrons()
        muons = self.Store.getMuons()
        etmiss = self.Store.getEtMiss()

        # selection Code goes here (TASK2)
        leptons = muons + electrons
        leptons = [lepton for lepton in leptons if lepton.Track != None]
        leptons = [lepton for lepton in leptons if lepton.Track.Pt > 10]
        leptons = sorted(leptons, key=lambda lepton: lepton.Track.Pt,reverse=True)

        # Cut 1, cut on etmiss
        if(etmiss.Et > 20.0): return False

        #tim
        #filters leptons, only leptons with pt > 10 GeV remain
        HighPtLeptons = [lepton for lepton in leptons if lepton.Track.Pt > 10]
        HighPtLeptons = [lepton for lepton in HighPtLeptons if lepton.Track.IsoPt/lep-
ton.Track.Pt < 0.2]
        if(len(HighPtLeptons) != 2): return False
        leadLepton = HighPtLeptons[0]
        trailLepton = HighPtLeptons[1]

        #cut on transverse momentum of leptons
        if leadLepton.Track.Pt < 20: return False
        if trailLepton.Track.Pt < 10: return False

        # check that leptons are charged oppositely
        if leadLepton.Track.Charge * trailLepton.Track.Charge >= 0: return False

        # check that leptons have same type (electrons and positron pair or muon antimuon pair)
        if leadLepton.__class__ != trailLepton.__class__ : return False

```

```

# Cuts on number of jets
if sum(1 for jet in jets if jet.Et > 25) > 1: return False

mass2 = 2*leadLepton.Track.Pt*trailLepton.Track.Pt -
Lepton.Track.Pt*(math.cosh(leadLepton.Track.Eta - trailLepton.Track.Eta) -
math.cos(leadLepton.Track.Phi - trailLepton.Track.Phi))

self.invMass.Fill(math.sqrt(mass2))

self.ZmassSum += math.sqrt(mass2)
self.Zmass2Sum += mass2
self.acceptedEventsCounter += 1
return True
def finalize(self):
    def meandeviation(sumx2, sumx, N):
        return math.sqrt(1.0/N**2 * (sumx2 - sumx**2/N))

    print ""
    print "Number of analyzed events " + str(self.preSelectionCounter)
    print "Number of accepted Events " + str(self.acceptedEventsCounter)
    print "Mean Z mass = " + str(self.ZmassSum/self.acceptedEventsCounter)
    print "Uncertainty on mean = " + str(meandeviation(self.Zmass2Sum, self.ZmassSum,
self.acceptedEventsCounter))

    self.invMass.Draw()

```

Job.py

```

import argparse
import sys
import os
import glob

import cProfile, pstats, StringIO

import XMLReader as reader
import Analysis

def makeDir(name):
    if(not os.path.exists(name)):
        os.makedirs(name)

class Job(object):
    """Job Class"""
    def __init__(self):
        super(Job, self).__init__()
        self.EventFiles = []
        self.CurrentEventFile = None
        self.Analyses = []
        self.Store = reader.XMLReader()

```

```

def setFiles(self, listOfFiles):
self.EventFiles = listOfFiles

def addAnalysis(self, analysis):
self.Analyses.append(analysis)

def run(self):
self.initialize()
for eventFile in self.EventFiles:
self.analyze(eventFile)
self.finalize()

def initialize(self):
[analysis.initialize() for analysis in self.Analyses]

def analyze(self, eventFile):
self.CurrentEventFile = eventFile
self.updateStatus()
self.Store.clear()
self.readEvent()
[analysis.analyze() for analysis in self.Analyses]

def finalize(self):
[analysis.finalize() for analysis in self.Analyses]
print ""

def readEvent(self):
self.Store.parseFile(self.CurrentEventFile)

def updateStatus(self):
percentageDone = float(self.EventFiles.index(self.CurrentEvent-
File))/float(len(self.EventFiles) + 1)*100
sys.stdout.write('\r')
# sys.stdout.write("%-120s\r" % "")
sys.stdout.write("[% -20s] %d%% Analyzing %s" % ('*int(percentageDone/5), per-
centageDone, self.CurrentEventFile))
sys.stdout.flush()
#=====
def main( argv ):
"""
Main function to be executed when starting the code.
"""

parser = argparse.ArgumentParser( description = 'Analysis Tool using XMLs' )
parser.add_argument('files', metavar='List of Files', type=str, nargs='+', help='files to be ana-
lyzed')
args = parser.parse_args()
job = Job()

# job.addAnalysis(Analysis.SingleWAnalysis(job.Store))
job.addAnalysis(Analysis.ZAnalysis(job.Store))

job.setFiles(args.files)

```

```
job.run()
#=====
if __name__ == "__main__":
    """
    Here the code should appear that is executed when running the plotter directly
    (and not import it in another python file via 'import Plotter')
    """

    # start main program
    # pr = cProfile.Profile()
    # pr.enable()
    main( sys.argv[1:] )
    # pr.disable()
    # s = StringIO.StringIO()
    # sortby = 'cumulative'
    # ps = pstats.Stats(pr, stream=s).sort_stats(sortby)
    # ps.print_stats()
    # print s.getvalue()
#=====
```

5.3 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.

Radebeul, den 10. Februar 2016

Tim Hebenstreit