

Advanced Laboratory Course

Wintersemester 09/10

Protokoll ad

ATLAS

Kian Salimkhani, Matthias Schmitz
Gruppe P24

Assistent: M. Schmitz

Universität Bonn
1. März 2010

Inhaltsverzeichnis

| | |
|---|-----------|
| 1. Einleitung | 3 |
| 2. Theoretische Grundlagen | 3 |
| 2.1. Das Standardmodell | 3 |
| 2.1.1. Teilchen | 3 |
| 2.1.2. Wechselwirkungen | 4 |
| 2.2. Neue Physik | 4 |
| 2.3. Kinematik | 5 |
| 2.3.1. Virtuelle Teilchen | 5 |
| 2.4. Der LHC | 6 |
| 2.5. ATLAS | 6 |
| 2.6. Koordinatensysteme | 6 |
| 3. Aufgaben vor Versuchsbeginn | 6 |
| 4. Versuchsdurchführung und Auswertung | 8 |
| 4.1. Teil 2: Kalibration der Elektronen | 8 |
| 4.2. Teil 3: Suche nach neuer Physik | 13 |
| 5. Zusammenfassung | 14 |
| A. Quellcode | 14 |
| A.1. ElecCalib.cpp | 14 |
| B. Tabellen | 15 |
| C. Literatur | 15 |

1. Einleitung

In diesem Praktikumsversuch soll die Physik des ATLAS-Experimentes kennengelernt und untersucht werden. So wird sich einleitend anhand von *event displays* mit den zu Grunde liegenden Prozessen und dem ATLAS vertraut gemacht. Anschließend wird die Messung der Elektronenenergie anhand der Z^0 -Masse kalibriert, woraufhin dann entweder eine Bestimmung der W-Boson-Masse oder aber die Suche nach neuer Physik anhand von simulierten ATLAS Daten erfolgt.

2. Theoretische Grundlagen

2.1. Das Standardmodell

Das Standardmodell der Teilchenphysik ist eine relativistische Quantenfeldtheorie und beschreibt mittels der drei Eichgruppen $SU(3) \times SU(2) \times U(1)$ die Elementarteilchen und deren Wechselwirkungen miteinander.

2.1.1. Teilchen

Das Standardmodell kennt zwei Sorten von Teilchen, die elementar oder zusammengesetzt sein können: Fermionen mit halbzahligem Spin und Bosonen mit ganzzahligem. Im Folgenden sollen nur Elementarteilchen betrachtet werden. Die Fermionen sind in Tabelle 1 aufgeführt. Man unterscheidet zwischen Quarks aus denen die Baryonen und Mesonen aufgebaut sind und Leptonen. Beide können in drei Generationen oder Familien angeordnet werden (siehe Tabelle 1). Neben der aufgeführten Eigenschaft der elektrischen Ladung haben im Standardmodell bis auf die Neutrinos alle Quarks und Leptonen eine Masse.

| | 1. Familie | 2. Familie | 3. Familie | elektrische Ladung/ e |
|----------|------------|------------|------------|-------------------------|
| Quarks | u | c | t | $+\frac{2}{3}$ |
| | d | s | b | $-\frac{1}{3}$ |
| Leptonen | ν_e | ν_μ | ν_τ | 0 |
| | e | μ | τ | -1 |

Tabelle 1: Fermionen des Standardmodells

Mit Hilfe der bosonischen Elementarteilchen werden die Wechselwirkungen zwischen den Teilchen beschrieben, welche als Eichfelder in die Theorie eingehen. Deshalb bezeichnet man diese Teilchen oft als Eichbosonen. In der Folgenden Tabelle sind die Eichbosonen des Standardmodells und die wichtigsten Eigenschaften aufgelistet.

| Eichboson | Bezeichnung | Spin | Masse/GeV | elektrische Ladung/ e | Wechselwirkung |
|-----------|-------------|------|--------------|-------------------------|-------------------|
| Photon | γ | 1 | 0 | 0 | elektromagnetisch |
| W-Bosonen | W^\pm | 1 | ≈ 80 | ± 1 | schwach |
| Z-Boson | Z^0 | 1 | ≈ 91 | 0 | schwach |
| Gluon | g | 1 | 0 | 0 | stark |
| Higgs | H | 0 | ? | 0 | |

Tabelle 2: Eichbosonen des Standardmodells (Higgs-Teilchen bisher nicht experimentell nachgewiesen)

Das Higgs (siehe Kapitel 2.2) wird zwar vom Standardmodell postuliert, wurde bisher aber nicht experimentell nachgewiesen.

2.1.2. Wechselwirkungen

Das Standardmodell kennt drei fundamentale Wechselwirkungen: die elektromagnetische, die schwache und die starke Wechselwirkung.

Die elektromagnetische Wechselwirkung wird mittels einer abelschen $U(1)$ Eichgruppe beschrieben, die Eichbosonen (Photonen) können also nicht aneinander koppeln. Da Photonen masselos sind, ist die elektromagnetische Wechselwirkung unendlichreichweitig.

Die über die Eichgruppe $SU(2)$ beschreibbare schwache Wechselwirkung lässt sich mit der elektromagnetischen zur sogenannten elektroschwachen Wechselwirkung $SU(2) \times U(1)$ vereinheitlichen. Auf Grund ihrer massiven Eichbosonen ist die Reichweite der schwachen Wechselwirkung sehr klein, jedoch koppeln diese an alle Teilchen.

Die starke Wechselwirkung wird von Gluonen vermittelt, welche die Ladung der starken Wechselwirkung, die Farbladung, selbst tragen, Selbstwechselwirkung ist also möglich. Beschrieben wird die Theorie der starken Wechselwirkung durch die nicht-abelsche Eichgruppe $SU(3)$. Gluonen sind zwar masselos, haben aber auf Grund der Selbstwechselwirkung nur eine geringe Reichweite. Es existieren nur gebundene, farblose Zustände, freie Quarks oder Gluonen gibt es nicht (*confinement*). Bei sehr kleinen Abständen, also hohen Übertragsimpulsen, sind Quarks „asymptotisch frei“.

2.2. Neue Physik

Die über das Standardmodell hinausgehenden theoretischen Überlegungen werden auch als „neue Physik“ bezeichnet. Man erhofft sich vom LHC (auch über ATLAS) u. a. hierzu Hinweise zu liefern. Die hier relevanten Kandidaten für neue Physik sind:

1. Das **Higgs-Boson** ist zwar Teil des Standardmodells und wird dort benötigt, um den schweren Eichbosonen sowie den übrigen Teilchen ihre Masse zu geben, wurde

bisher aber noch nicht experimentell nachgewiesen, weshalb es hier unter „neuer Physik“ aufgeführt wird. In der einfachsten Theorie ist das Higgs-Boson ein reelles skalares Feld, hat also Spin 0 und würde sich über einen Peak in der Verteilung der invarianten Masse zeigen.

2. In der Theorie der **Supersymmetrie** werden Partnerteilchen zu den Standardmodell-Teilchen postuliert und zwar zu jedem Fermion ein bosonischer supersymmetrischer Partner und zu jedem Boson ein fermionischer supersymmetrischer Partner. Die Massen der SuSy-Teilchen sind nicht bekannt, sie sollten jedoch deutlich höher liegen als die ihrer Partnerteilchen, da man sonst beispielsweise den SuSy-Partner zum Elektron bereits gefunden haben müsste. Auch hier gibt es mehrere zur Auswahl stehende Theorien, wobei wir uns hier auf eine Theorie mit Neutralino als LSP (lightest supersymmetric particle) beschränken. Das Neutralino müsste sich im Experiment durch fehlenden Transversalimpuls kennzeichnen.
3. Eine weitere Möglichkeit für neue Physik sind **schwere Quarks**. So ist es durchaus denkbar, dass es noch eine weitere, vierte Leptonen- und Quark-Generation gibt. Aus der Breite des Z^0 -Peaks erhält man jedoch als obere Grenze für die Anzahl der leichten Neutrinos drei, gäbe es also eine vierte Familie, so müssten die Teilchen dieser deutlich schwerer sein als die bisherigen. Die Quarks dieser Familie wären also schwer und würden sich vor allem durch eine hohe Anzahl hadronischer Jets auszeichnen.
4. In verschiedenen Theorien werden **weitere schwere Eichbosonen** Z' vorhergesagt. Hier sollen die Daten beispielsweise darauf untersucht werden, ob es ein weiteres schweres Eichboson mit ähnlichen Eigenschaften wie das Z^0 gibt, das aber deutlich schwerer wäre als dieses. Es soll ebenfalls an Quarks und Leptonen gleichermaßen koppeln und würde in ein Leptonenpaar oder ein Quarkpaar zerfallen. Es kann nicht nur einzeln, sondern auch paarweise oder zusammen mit einem Z^0 produziert werden und würde mit letzteren beiden Möglichkeiten zu einem Vier-Leptonen-Endzustand beitragen, was für die Auswertung der Daten interessant ist.

2.3. Kinematik

2.3.1. Virtuelle Teilchen

Teilchen können nach der HEISENBERGSchen Unschärferelation für kurze Zeit die für reelle Teilchen geltende Relation $E^2 - p^2 = m^2$ verletzen. Solche Teilchen bezeichnet man als „virtuell“ oder als nicht auf der Massenschale liegend. Sie können nicht experimentell gemessen werden, vermitteln aber nach der Theorie die jeweilige Wechselwirkung. Um ein virtuelles Teilchen als solches zu kennzeichnen, verwendet man ein $*$.

2.4. Der LHC

2.5. ATLAS

2.6. Koordinatensysteme

Bei der Wahl eines angemessenen Koordinatensystems bieten sich im Wesentlichen drei an. Zum einen besteht die Möglichkeit in einem kartesischen Koordinatensystem die Strahlrichtung als z-Achse zu wählen, zum Mittelpunkt des LHC-Ringes zeigt die x-Achse und orthogonal auf beiden steht die y-Achse. Zum anderen steht die Wahl eines kanonischen Kugelkoordinatensystems zur Verfügung. Da jedoch die Ereignisse nicht gleichverteilt auftreten, sondern auf Grund der nur geringen Transversalimpulse eine Häufung bei kleinen Winkeln zu erwarten ist, modifiziert man das Koordinatensystem und führt eine neue Größe ein, die Rapidität $y \equiv \frac{1}{2} \ln \frac{E+p_z}{E-p_z}$. Rapiditätsdifferenzen sind invariant unter Lorentz-Boosts parallel zu z-Achse. In Systemen in denen die Partonenmassen vernachlässigt werden können erhält man mit dem Winkel θ zur Strahlachse stattdessen die sogenannte Pseudo-Rapidität

$$\eta = -\ln \left(\tan \frac{\theta}{2} \right). \quad (1)$$

Der ATLAS-Detektor kann Pseudo-Rapiditäten $|\eta| < 2,5$ für Leptonen sowie $|\eta| < 5$ für Hadronen auflösen.

3. Aufgaben vor Versuchsbeginn

Frage A: Zerfall des Z^0 -Bosons

Welchen Wert hat der Impuls eines Elektrons beim Zerfall des Z^0 -Bosons ($Z^0 \rightarrow e^+e^-$) im Ruhesystem des Z^0 -Bosons?

Das Z^0 -Boson wird in Ruhe betrachtet, hat also einen verschwindenden Dreier-Impuls \mathbf{p}_Z . Da Vierer-Impuls-Erhaltung gilt, verschwindet auch die Summe der Dreier-Impulse von Positron und Elektron ($\mathbf{p}_{e^+} = -\mathbf{p}_{e^-}$). Man betrachte also die 0-Komponente der Vierer-Impulse:

$$\begin{aligned}
E_{Z^0} &= E_{e^+} + E_{e^-} \\
\Rightarrow m_{Z^0}^2 &= 2E_{e^-}^2 \\
&= 2\sqrt{m_e^2 + p_e^2}^2 \\
\Rightarrow p_e^2 &= \frac{m_{Z^0}^2}{4} - m_e^2 \\
\Rightarrow p_e &= \sqrt{\frac{m_{Z^0}^2}{4} - m_e^2} \\
&= 45,6 \text{ GeV}
\end{aligned}$$

Frage B: Elektron-Positron-Streuung

Wie groß ist der Impuls der τ -Leptonen bei der Reaktion $e^+e^- \rightarrow \tau^+\tau^-$ im CMS ($\sqrt{s} = 5 \text{ GeV}$)?

Es gilt Energieerhaltung ($s = s'$), somit folgt:

$$\begin{aligned}
\sqrt{s} &= E_{\tau^+} + E_{\tau^-} \\
&= 2E_{\tau^+} \\
&= 2\sqrt{m_\tau^2 + p_\tau^2} \\
\Rightarrow p_\tau^2 &= \frac{s}{4} - m_\tau^2 \\
\Rightarrow p_\tau &= \sqrt{\frac{s}{4} - m_\tau^2} \\
\Rightarrow p_\tau &= 1,76 \text{ GeV}
\end{aligned}$$

Fragen zu Versuchsteil 2

Wie kann der Transversalimpuls des W -Bosons bestimmt werden? Wie können Sie die Variable **ptw** aus den anderen **ROOT**-Variablen bestimmen?

Leiten Sie aus Gleichung (4.4) die Gleichung (4.5) her. [1]

Fragen zu Versuchsteil 3

Fragen zu Versuchsteil 4

Was ist die minimale invariante Masse der vier Leptonen aus einem Z^0 -Paar? Weshalb findet man auch unterhalb dieser Schwelle Vier-Lepton-Ereignisse?

Ein Higgs-Boson zerfalle in zwei Z^0 . Wie sieht die Verteilung der invarianten Masse der vier Leptonen aus?

Ein idealer Detektor wird vorausgesetzt. Welches ist das typische $/E_T$, wenn ein Z^0 -Paar in Elektronen oder Myonen-Paare zerfällt? Wie wird $/E_T$ bei einem realen Detektor aussehen?

noch ne frage ...

un noch eine ...

4. Versuchsdurchführung und Auswertung

4.1. Teil 2: Kalibration der Elektronen

Die genaueste Methode, die Energie eines Elektrons zu bestimmen, ist die Messung der Energie des elektromagnetischen Schauers, den das Elektron im Kalorimeter auslöst. Da das Kalorimeter aus vielen hundert Einzelteilen mit verschiedenen Eigenschaften besteht und systematische Energieverluste durch inaktive Regionen im Detektor sowie Energieverluste der Elektronen vor Erreichen des Kalorimeters vorliegen, muss diese Energiemessung kalibriert werden. Diese Kalibration lässt sich auf Grund der sehr genau bekannten Eigenschaften des Z^0 anhand dessen Zerfall in ein e^+e^- -Paar durchführen. Dazu stehen uns Daten solcher gemessener Zerfälle zur Verfügung, die wir mit Hilfe des Programms **ROOT** analysieren.

Zuerst plotten wir die in Abbildung 1 bzw. Abbildung 2 dargestellten Histogramme der gemessenen Elektron- bzw. Positron-Energie. Wir stellen fest, dass beide Histogramme einen Peak bei etwa der halben Z^0 -Masse enthalten. Entsteht bei dem harten Streuprozess ein im Laborsystem ruhendes Z^0 , so kann es in ein Leptonpaar mit genau entgegengesetzten Impulsen zerfallen. Die beiden Leptonen haben dann jeweils die Energie der halben Z^0 -Masse, sodass der beschriebene Peak im Histogramm entsteht.

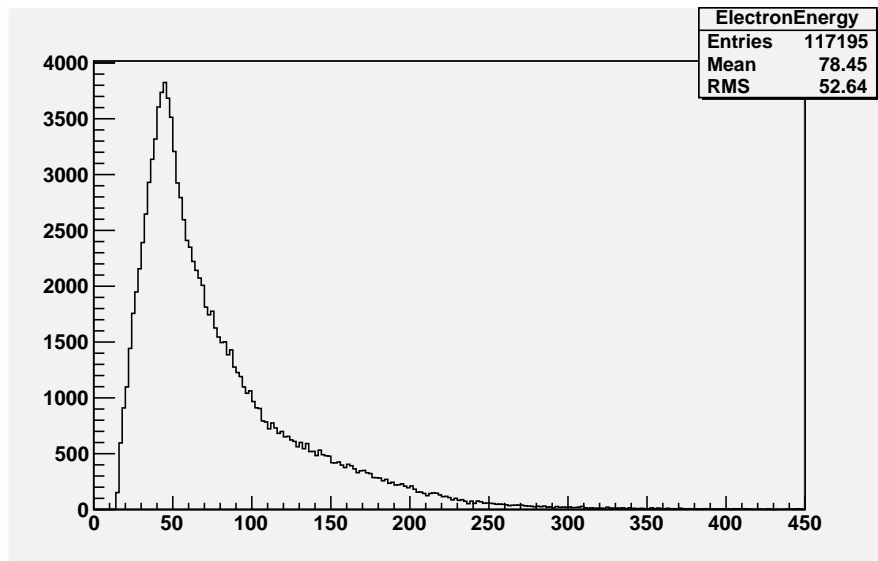


Abbildung 1: Energie des Elektrons beim Zerfall $Z^0 \rightarrow e^+e^-$ mit unkalibrierter Energiemessung

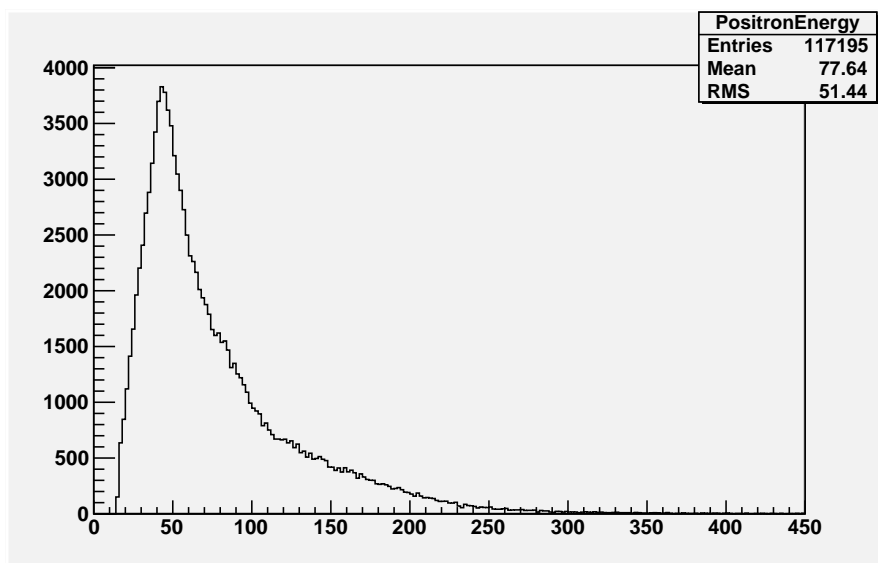


Abbildung 2: Energie des Positrons beim Zerfall $Z^0 \rightarrow e^+e^-$ mit unkalibrierter Energiemessung

Als nächstes plotten wir ein Histogramm der invarianten Masse des Elektron-Positron-Paars und passen eine VOIGT-Funktion an den erhaltenen Graphen an (siehe Abbildung 3). Die VOIGT-Funktion ist das Ergebnis einer Faltung der BREIT-WIGNER-Resonanzkurve mit einer GAUSS-Verteilung, welche die Verbreiterung der Kurve durch Detektoreffekte

approximiert. Wie erwartet zeigt der Graph einen Peak, der aufgrund der mangelnden Kalibration der Energiemessung nicht genau mit der Z^0 -Masse übereinstimmt.

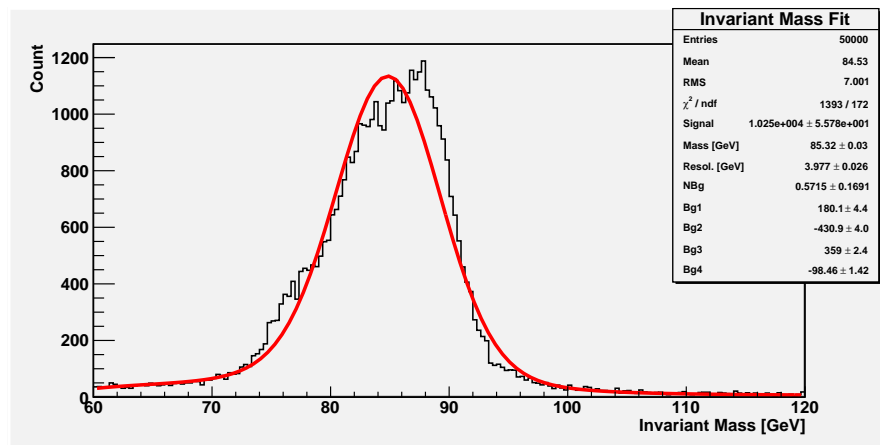


Abbildung 3: Invariante Masse des Leptonpaars beim Zerfall $Z^0 \rightarrow e^+e^-$ mit unkalibrierter Energiemessung

Zur Kalibration betrachtet man nun die Position des Z^0 -Peaks in Abhängigkeit verschiedener Variablen. Anschließend kann man diese durch Multiplikation der Energiewerte mithilfe eines C++-Skriptes auf die bekannte Z^0 -Masse korrigieren. Es stehen folgende Variablen zur Verfügung:

- **E_raw**: Die unkalibrierte Energie
- **pt**: Der transversale Impuls
- **phi, eta**: Richtung des Elektrons (azimutaler Winkel ϕ und η)
- **etiso**: Transversale Energie im Kalorimeter in der Umgebung des Elektrons
- **eoverp**: Verhältnis zwischen Elektron-Energie und -Impuls
- **drjet**: Abstand des Elektrons zum nächsten Jet (in der $\eta\phi$ -Ebene)

Als Beispiel sei in Abbildung 4 die gemessene Z^0 -Resonanz für verschiedene η -Bereiche dargestellt.

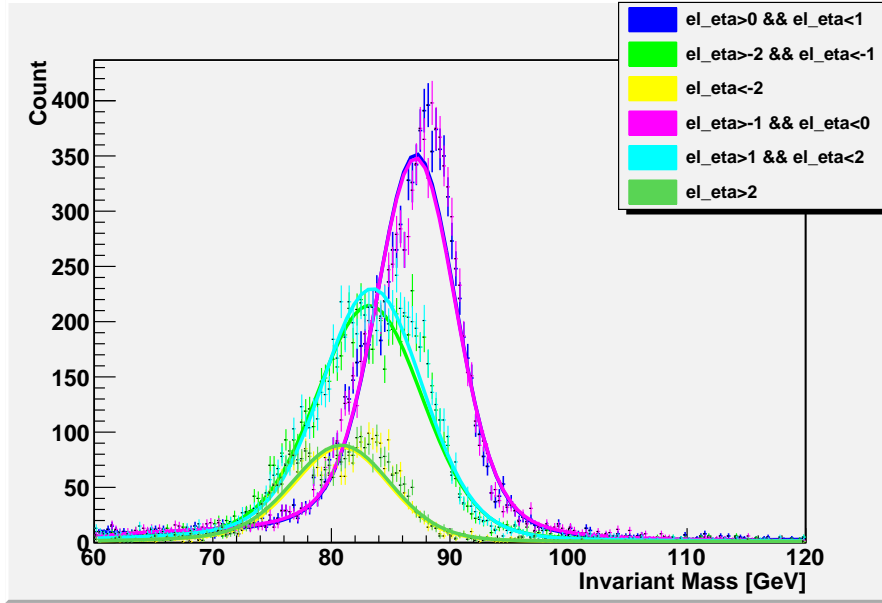


Abbildung 4: Invariante Masse des Leptonpaares beim Zerfall $Z^0 \rightarrow e^+e^-$ für verschiedene Bereiche der Pseudorapidität η des Elektrons vor der Kalibration

Für die verschiedenen η -Bereiche lassen sich nun verschiedene Multiplikatoren für die Energiewerte bestimmen um die Z^0 -Resonanz jeweils auf den richtigen Wert zu verschieben. Dieses Verfahren kann man iterativ auch auf die anderen Variablen anwenden. Das von uns auf diese Weise geschriebene Skript findet sich im Anhang A.1. In Abbildung 5 ist analog zu Abbildung 4 die gemessene Z^0 -Resonanz für verschiedene Werte von η nach der Kalibration dargestellt. In Abbildung 6 findet sich der Fit an die Gesamtverteilung nach der Kalibration inklusive der Fitparameter. Die gemessene Z^0 -Masse ist nun mit $(91,17 \pm 0,02)$ GeV sehr gut verträglich mit dem Literaturwert von $(91,1876 \pm 0,0021)$ GeV. Die Auflösung des Detektors hat sich von $(3,977 \pm 0,026)$ GeV auf $(1,963 \pm 0,020)$ GeV verbessert.

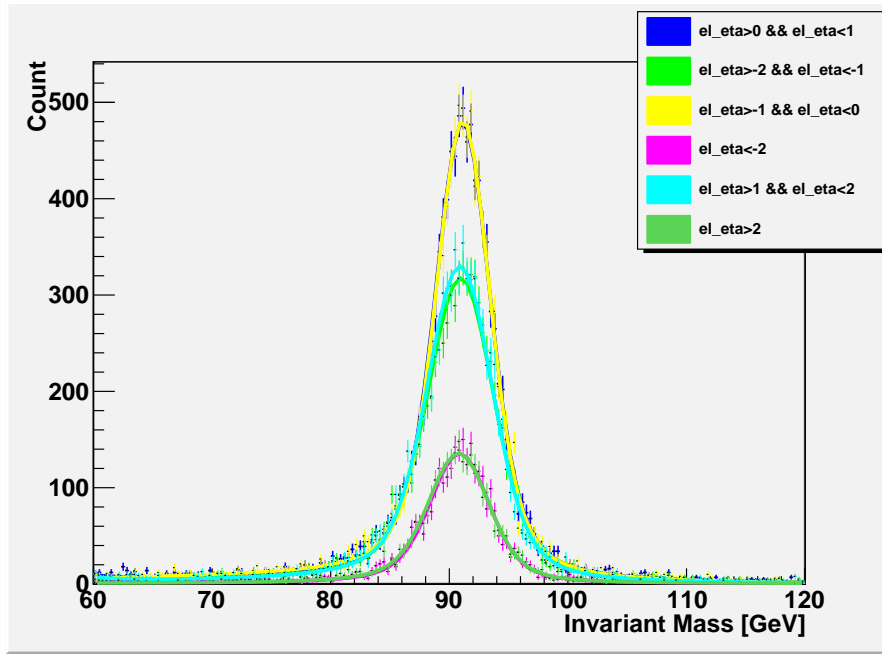


Abbildung 5: Invariante Masse des Leptonpaares beim Zerfall $Z^0 \rightarrow e^+e^-$ für verschiedene Bereiche der Pseudorapidität η des Elektrons nach der Kalibration

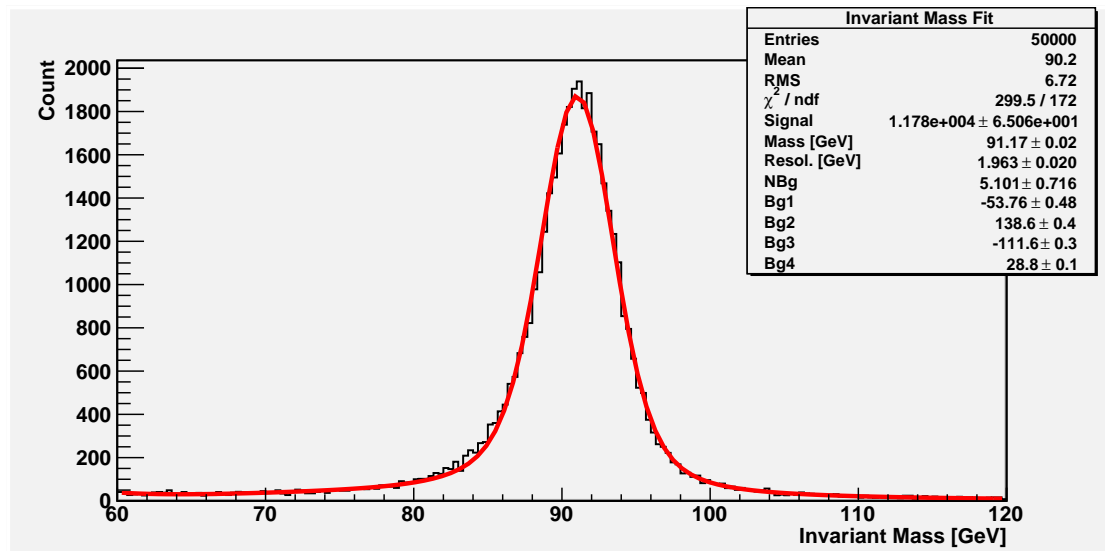


Abbildung 6: Invariante Masse des Leptonpaares beim Zerfall $Z^0 \rightarrow e^+e^-$ nach der Kalibration mit Voigt-Fit und Parametern

4.2. Teil 3: Suche nach neuer Physik

In diesem Versuchsteil wollen wir nach Hinweisen auf neue Physik (wie in Abschnitt XXX beschrieben) suchen. Dazu betrachten wir Daten mit 4-Lepton-Endzuständen.

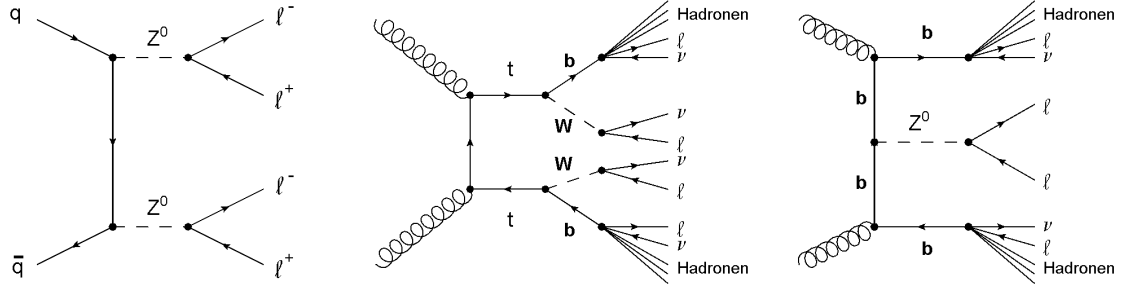


Abbildung 7: Dominante Standardmodell-Prozesse mit vier-Lepton-Endzuständen

Aus dem Standardmodell (ohne Higgs Boson) ergeben sich drei dominante Prozesse, die zu 4-Lepton-Endzuständen führen können. Sie sind in Abbildung 7 dargestellt. Daneben gibt es einige Szenarios neuer Physik die weitere Prozesse mit solchen Endzuständen vorhersagen:

- Das **Higgs Boson** kann über den Prozess $H \rightarrow Z Z \rightarrow l^+ l^- l'^+ l'^-$ zerfallen (Siehe Abbildung 8).

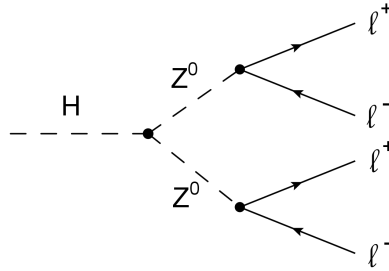


Abbildung 8: Zerfall des Higgs Bosons über ein Z^0 Paar in 2 Leptonenpaare.

- In der **Supersymmetrie**-Erweiterung des Standardmodells gibt es einige Prozesse deren Endzustände 4 Leptonen enthalten. Beispiele dafür sind die in Abbildung 9 bzw. Abbildung 10 dargestellten Zerfallskaskaden mit Neutralino- bzw. b-squark-Paarproduktion.

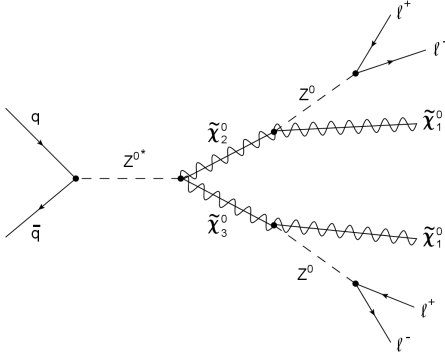


Abbildung 9: SUSY Zerfallskaskade mit Neutralino-Paarproduktion.

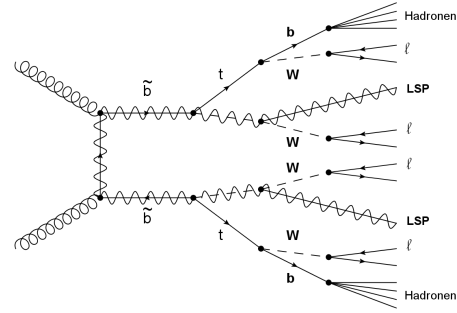


Abbildung 10: SUSY Zerfallskaskade mit b-squark-Paarproduktion.

- Erweitert man das Standardmodell durch zusätzliche **schwere Quarks** kann unter der Voraussetzung, dass das schwere down-type Quark wesentlich schwerer als das top-Quark ist, der folgende Prozess mit vier Leptonen im Endzustand auftreten:

$$d_4 \bar{d}_4 \rightarrow t W^- \bar{t} W^+ \rightarrow b W^+ W^- \bar{b} W^- W^-$$

- In Theorien mit zusätzlichen **schweren Eichbosonen**, die ähnliche Eigenschaften wie das Z^0 Boson haben können ebenfalls Prozesse mit vier-Lepton-Endzuständen auftreten, da die zusätzlichen Eichbosonen ebenfalls in Leptonpaare zerfallen können.

5. Zusammenfassung

A. Quellcode

A.1. ElecCalib.cpp

```
double ElecCalib(double e_raw, double pt, double eta,
                 double phi, double etiso, double eoverp, double mindrjet)
{
    double energy = e_raw;
    if ((eta)>2.0) energy = energy *
        91.1876/81.25*91.1876/88.93*91.1876/90.41*91.1876/90.87;
    else if ((eta)>1.5) energy = energy *
        91.1876/82.03*91.1876/89.06*91.1876/90.3*91.1876/90.77;
    else if ((eta)>1.0) energy = energy *
        91.1876/85.25*91.1876/90.88*91.1876/91.28*91.1876/91.29;
    else if ((eta)>0.0) energy = energy *
        91.1876/88.29*91.1876/91.67*91.1876/91.42*91.1876/91.27;
    else if ((eta)>-1.0) energy = energy *
        91.1876/91.2641*91.1876/88.4924*91.1876/91.2573*91.1876/91.4781*91.1876/91.3602;
```

```

10  else if ((eta)>-1.5) energy = energy *
    91.1876/91.1872*91.1876/85.7911*91.1876/90.4713*91.1876/91.1639*91.1876/91.2424;
    else if ((eta)>-2.0) energy = energy *
    91.1876/90.7617*91.1876/82.0698*91.1876/88.7481*91.1876/90.4027*91.1876/90.869;
    else if ((eta)>-2.5) energy = energy *
    91.1876/90.8539*91.1876/81.5198*91.1876/88.6939*91.1876/90.4605*91.1876/90.8548;

    if (fabs(phi)>2.0) energy = energy * 91.1876/91.3577*91.1876/91.1852;
    else if (fabs(phi)>1.5) energy = energy * 91.1876/91.2691*91.1876/91.1819;
    else if (fabs(phi)>1.0) energy = energy * 91.1876/91.2028*91.1876/91.253;
    else if (fabs(phi)>0.0) energy = energy * 91.1876/91.2374*91.1876/91.2807;

    if (pt>75) energy = energy *
    91.1876/90.3534*91.1876/90.8199*91.1876/90.9337*91.1876/91.0716;
20  else if (pt>50) energy = energy *
    91.1876/91.2934*91.1876/91.2528*91.1876/91.2152*91.1876/91.1986;
    else if (pt>25) energy = energy *
    91.1876/91.1039*91.1876/91.1697*91.1876/91.1801*91.1876/91.1844;
    else if (pt>0) energy = energy *
    91.1876/91.4275*91.1876/91.2845*91.1876/91.2393*91.1876/91.2064;

    if (eoverp>7.5) energy = energy*91.1876/92.5439*91.1876/92.3647*91.1876/92.5107;
    else if (eoverp>5.0) energy = energy*91.1876/91.3806*91.1876/91.3122*91.1876/91.3581;
    else if (eoverp>2.5) energy = energy*91.1876/90.3963*91.1876/90.334*91.1876/90.3737;
    else if (eoverp>0) energy = energy*91.1876/91.1876*91.1876/91.1876*91.1876/91.1876;

    if (etiso>1.5) energy = energy*91.1876/91.3671*91.1876/91.1977;
30  else if (etiso>1.0) energy = energy*91.1876/91.3977*91.1876/91.2983;
    else if (etiso>0.5) energy = energy*91.1876/91.3588*91.1876/91.2324;
    else if (etiso>0) energy = energy*91.1876/91.1515*91.1876/91.0749;

    if (mindrjet>7.5) energy = energy*91.1876/91.1876*91.1876/91.1876*91.1876/91.1876;
    else if (mindrjet>5.0) energy = energy*91.1876/90.7937*91.1876/91.1729;
    else if (mindrjet>2.5) energy = energy*91.1876/91.1319*91.1876/91.1002;
    else if (mindrjet>0) energy = energy*91.1876/91.0853*91.1876/91.0663;

    return energy;
40 }

```

B. Tabellen

C. Literatur

- [1] Universität Bonn, *Skript zum ATLAS-Versuch [English-Version]* (2008).