



## HANDOUT FÜR TEILCHENPHYSIK-MASTERCLASSES

ATLAS-DATEN: Z-PFAD

### Liebe Vermittler,

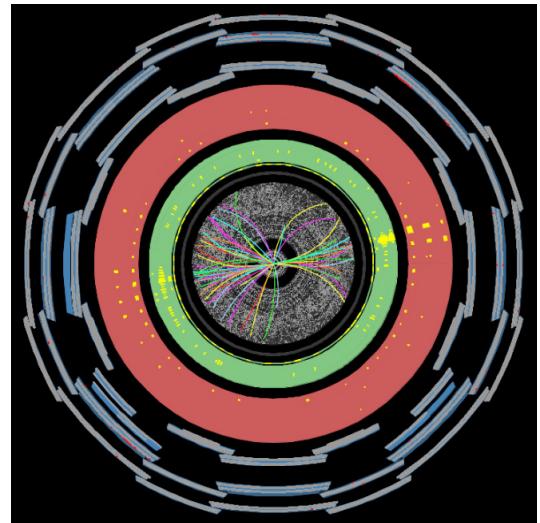
das vorliegende Handout unterstützt die Teilnehmer von Teilchenphysik-Masterclasses bei der Messung und ermöglicht ihnen weitgehend selbständiges Arbeiten. Teilnehmer und Lehrkräfte können das Handout mitnehmen und für die Nachbereitung der Masterclass nutzen.

Idealerweise wird das Handout doppelseitig in Farbe ausgedruckt. Sie können es nach der ersten Einführung oder vor der Messung an die Teilnehmer der Masterclass verteilen.

Das Handout enthält

- die Aufgabenstellung und die Kriterien, anhand welcher die Teilnehmer Z-Signale erkennen (S. 1),
- die wichtigsten Funktionen der Software Hypatia (S. 2),
- die Darstellung von Teilchenspuren im Event-Display (S. 3),
- und Informationen über Elementarteilchen und Wechselwirkungen (S. 4).

Viel Spaß wünscht  
das Teilchenwelt-Team





# ANALYSE VON LHC-DATEN: Z-PFAD

## ANLEITUNG ZUR AUSWERTUNG VON TEILCHENSPUREN

### DER HINTERGRUND

Im Teilchenbeschleuniger LHC am internationalen Forschungszentrum CERN bei Genf kollidieren Protonen mit einer Bewegungsenergie von jeweils 4 TeV. Das entspricht mehr als dem 4000-fachen ihrer Ruhemasse! Bei der Kollision entsteht eine Vielzahl neuer Teilchen. Diese können sogar eine größere Masse haben als die ursprünglichen Protonen, da bei der Kollision ein Teil von deren Bewegungsenergie in Masse umgewandelt wird. Die entstandenen Teilchen oder ihre Zerfallsprodukte werden in Detektoren nachgewiesen. So wollen Forscher beispielsweise das Higgs-Boson erzeugen oder herausfinden, woraus Dunkle Materie besteht.

### DAS THEMA: Z-BOSONEN

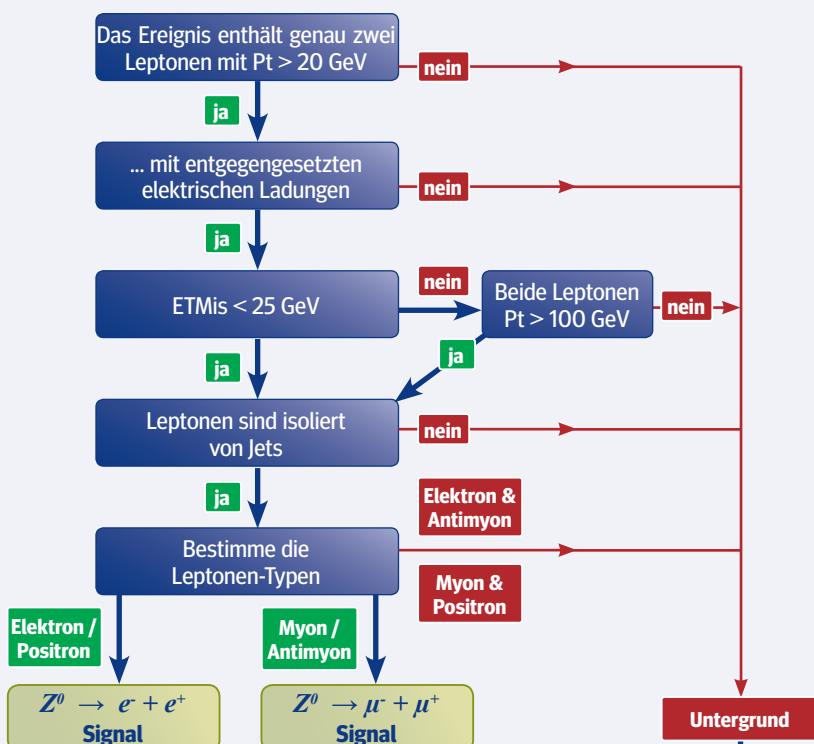
Das Z-Boson ( $Z^0$ ) ist ein massereiches, elektrisch neutrales Austauschteilchen der Schwachen Wechselwirkung. Es wurde 1983 entdeckt. Heute werden wir anhand dieses Beispiels nachvollziehen, wie Forscher neue Elementarteilchen nachweisen.

Z-Bosonen zerfallen nach ihrer Entstehung sehr schnell in ein Teilchen und dessen Antiteilchen. Daher kann man Z-Bosonen nicht direkt im Detektor nachweisen. Stattdessen sucht man nach ihren Zerfallsprodukten. Wir beschränken uns bei der Datenanalyse auf zwei Möglichkeiten:

$$Z^0 \rightarrow e^- + e^+ \quad \text{und} \quad Z^0 \rightarrow \mu^- + \mu^+$$

### DATENANALYSE: SO UNTERSUCHST DU EREIGNISBILDER

Überprüfe bei jedem Ereignis, ob die **Kriterien für einen Z-Zerfall** erfüllt sind:



Wenn du ein Signal identifiziert hast (also einen möglichen Z-Zerfall), berechnest du die Masse des zerfallenen Teilchens (s. Seite 2):





# DIE SOFTWARE HYPATIA

## ANLEITUNG ZUR AUSWERTUNG VON TEILCHENSPUREN

- Öffne das **Programm HYPATIA** und lade das erste Ereignisbild aus dem Datenpaket mit deinem Buchstaben.
- Öffne die **Auswertungstabelle** und speichere sie unter „groupX“; ersetze X durch deinen Buchstaben.
- Wo du diese Dateien findest bzw. speichern kannst, weiß der/die Vermittler/-in.

### DIE WICHTIGSTEN FUNKTIONEN DER SOFTWARE:

- ① Datenpaket laden
- ② Datenpaket durchblättern
- ③ Fehlende Energie (ETMis)
- ④ Spurauswahl
- ⑤ Elektrische Ladung
- ⑥ Pt (transversaler Impuls)
- ⑦ Spur als Elektron identifizieren
- ⑧ Spur als Myon identifizieren

Track	+/-	P [GeV]	Pt [GeV]	$\phi$	$\theta$
Tracks 0	④	⑤ 7,84	4,18 ⑥	-1,569	2,579
Tracks 1	+	4,82	2,20	-1,789	2,666
Tracks 2	-	6,99	3,38	-1,474	2,636
Tracks 3	-	87,55	71,08	1,896	0,947

### BERECHNUNG DER MASSE DES ZERFALLENEN TEILCHENS:

- Wähle die Spur des ersten Leptons aus ④ .
- Klicke dann je nach Art des Leptons auf „Insert electron“ ⑦ bzw. „Insert muon“ ⑧ .
- Verfahren ebenso mit der zweiten Spur.

Die Software berechnet die Gesamtenergie im Schwerpunktssystem der beiden Leptonen. Wenn die Leptonen aus dem Zerfall eines Teilchens stammen, entspricht ihre Gesamtenergie der **Masse des zerfallenen Teilchens**. Sie wird im „**Invariant Mass Window**“ angezeigt. ⑨

File Name	ETMis [GeV]	Track	P [GeV]	+/-	Pt [GeV]	$\phi$	$\eta$	$M(2l)$ [GeV]
00402_JiveXML_166924_22551873.xml	17,704	Tracks 76	80,1	-	67,7	-0,150	-0,598	88,624
		Tracks 98	40,6	+	33,5	2,240	-0,638	

- Trage die Masse des zerfallenen Teilchens in die **Auswertungstabelle** in die Spalte „Inv. mass [GeV]“ ein.
- Setze eine „1“ in die entsprechende Spalte für Elektronen oder Myonen.

### DU KANNST TEILCHEN MIT NIEDRIGEM IMPULS AUSSORTIEREN:

Gib im „Control Window“ in der Registerkarte **Cuts** ⑩ unter **|Pt|** ⑪ einen Mindestimpuls ein. Alle Teilchenspuren mit kleinerem Impuls werden ausgeblendet.

Gib danach wieder einen niedrigeren Pt ein!  
Sonst kannst du keine Jets identifizieren.

Projection	Data	Cuts	InDet	Calo	MuonDet	Objects	Geometry
InDet							
Calo							
MuonDet							
Objects							
ATLAS							

Das **Elektronenvolt (eV)** ist eine Energieeinheit.  $1 \text{ eV}$  entspricht  $1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Joule}$ . Wegen  $E=mc^2$  kann die Masse eines Teilchens in der Einheit  $[\text{eV}/c^2]$  gemessen werden. Da die Lichtgeschwindigkeit c konstant ist, wird dieser Faktor häufig gleich 1 gesetzt. Masse und Impuls werden dann auch in der Einheit [eV] angegeben.

$4 \text{ TeV} \approx \text{Bewegungsenergie der Protonen im LHC}; 0,94 \text{ GeV} \approx \text{Masse eines Protons}$ .

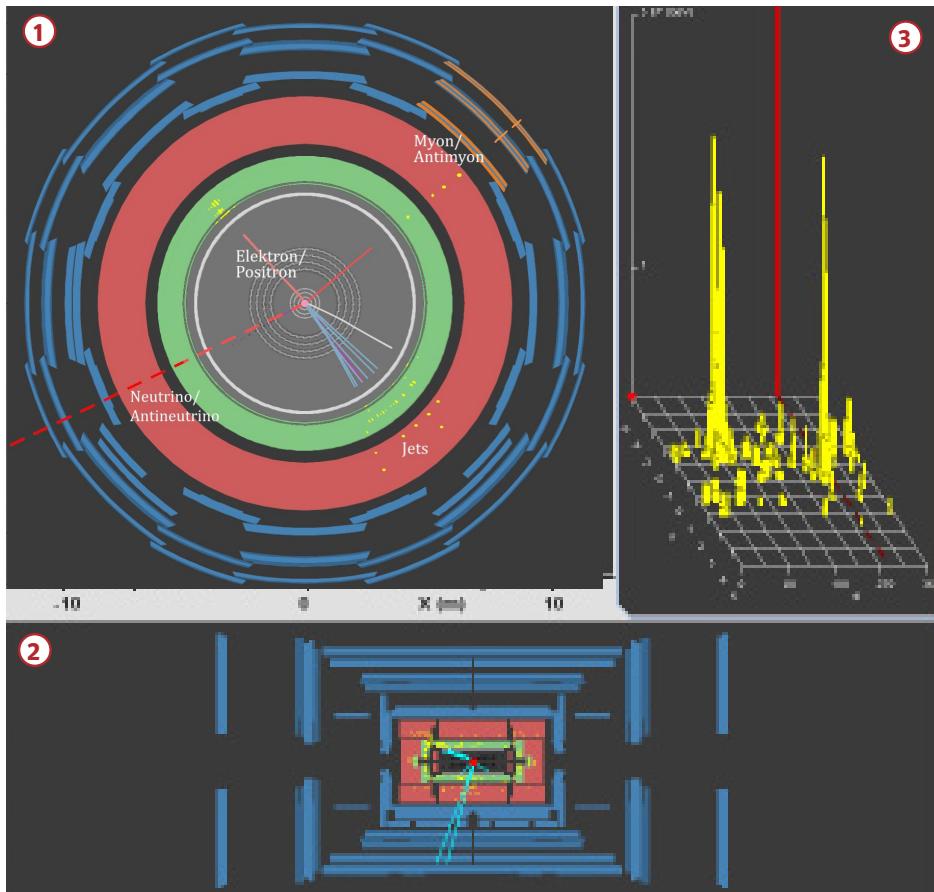


## TEILCHENSPUREN IM ATLAS-DETEKTOR

### DAS EVENT-DISPLAY (SOFTWARE HYPATIA)

Unten siehst du ein Ereignisbild (Event-Display), in dem Spuren von Teilchen im ATLAS-Detektor dargestellt sind. Die Schichten des Detektors sind farblich gekennzeichnet:

- |                                 |                          |
|---------------------------------|--------------------------|
| Spurdetektoren                  | Hadronisches Kalorimeter |
| Elektromagnetisches Kalorimeter | Myonenkammern            |



© ATLAS collaboration

- ① Die **Frontalansicht** zeigt den ringförmigen Aufbau des ATLAS-Detektors senkrecht zum Strahlrohr.
- ② Die **Seitenansicht** zeigt einen Längsschnitt durch den Detektor entlang des Strahlrohrs.
- ③ Das **Energiehistogramm** zeigt die in den Kalorimetern deponierte Energie an (gelb).



#### Beachte immer beide Detektor-Ansichten!

Teilchenspuren, die fast parallel zum Strahlrohr verlaufen, siehst du nur in der Seitenansicht. Neutrinos siehst nur in der Frontalansicht und im Energiehistogramm (roter Balken).

## TEILCHENSPUREN

**Elektronen und Positronen** (Kürzel:  $e^-$  bzw.  $e^+$ ) hinterlassen eine Spur im **Spurdetektor** und geben ihre Energie im **elektromagnetischen Kalorimeter** ab (gelbe Punkte).

Energieriche **Quarks** erzeugen **Teilchenbündel (Jets)** aus Hadronen. Diese hinterlassen mehrere Spuren im **Spurdetektor** und geben ihre Energie in **beiden Kalorimetern** ab (gelbe Punkte).

**Myonen und Antimyonen** (Kürzel:  $\mu^-$  bzw.  $\mu^+$ ) hinterlassen **Signale in allen Detektorschichten**.

**Neutrinos und Antineutrinos** (Kürzel:  $\nu$  bzw.  $\bar{\nu}$ ) können die Detektoren **nicht direkt nachweisen**. Doch wenn in den Kalorimetern viel Energie „fehlt“, sind wahrscheinlich ein oder mehrere Neutrinos die Ursache dafür. Eine **rot gestrichelte Linie** zeigt die Richtung der fehlenden Energie an.



# DAS STANDARDMODELL DER TEILCHENPHYSIK

## ELEMENTARTEILCHEN UND IHRE WECHSELWIRKUNGEN

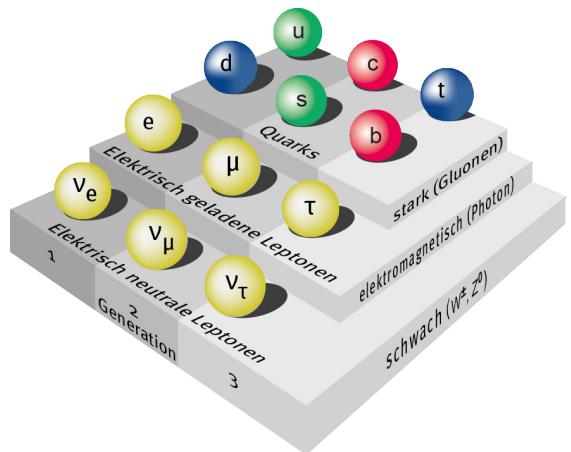
Alle Materie besteht aus **Elementarteilchen**, die sich nicht weiter zerteilen lassen:

- ▶ Sechs Arten von **Quarks** ...
- ▶ ... und sechs Arten von **Leptonen**:
  - Elektronen, Myonen und Tauonen (mit elektrischer Ladung),
  - und drei Arten von Neutrinos (ohne elektrische Ladung).

Stabile Materie in unserer Umgebung besteht nur aus Elektronen, Up- und Down-Quarks.

Von den Teilchen der ersten Generation gibt es jeweils zwei massereichere Versionen mit gleichen Ladungen (2. und 3. Generation).

Jedes Materienteilchen hat ein Antiteilchen mit gleicher Masse, aber entgegengesetzten Ladungen.



Es gibt vier **Wechselwirkungen**, mit denen man alle Vorgänge in der Natur beschreiben kann. Sie werden durch **Austauschteilchen** vermittelt.

Betroffene Materie-Teilchen	Starke Wechselwirkung Quarks	Elektromagnetische Wechselwirkung Quarks und elektrisch geladene Leptonen	Schwache Wechselwirkung Alle
Zugehörige Ladung	starke Ladung (Farbladung)	elektrische Ladung	schwache Ladung
Austauschteilchen	Gluonen	Photon	$W^+, W^-, Z^0$
Wirkungen	Anziehung zwischen Quarks; Zusammenhalt von Atomkernen	Licht, Strom, Magnetismus, Zusammenhalt von Atomen...	Betazerfall, Kernfusion...
Reichweite	$10^{-15}$ m (Protonendurchmesser)	unbegrenzt	$10^{-18}$ m (1/1000 Protonendurchmesser)

Die vierte Wechselwirkung ist die Gravitation. Sie ist mit Abstand die schwächste Wechselwirkung und spielt für Elementarteilchen keine Rolle.



Infos, Links, Newsletter und Forum zur Teilchenphysik: [www.teilchenwelt.de](http://www.teilchenwelt.de)  
 Software HYPATIA und Datenpakete: <http://atlas.physicmasterclasses.org/de/zpath.htm>  
 Infos rund um den LHC: [www.weltmaschine.de](http://www.weltmaschine.de)