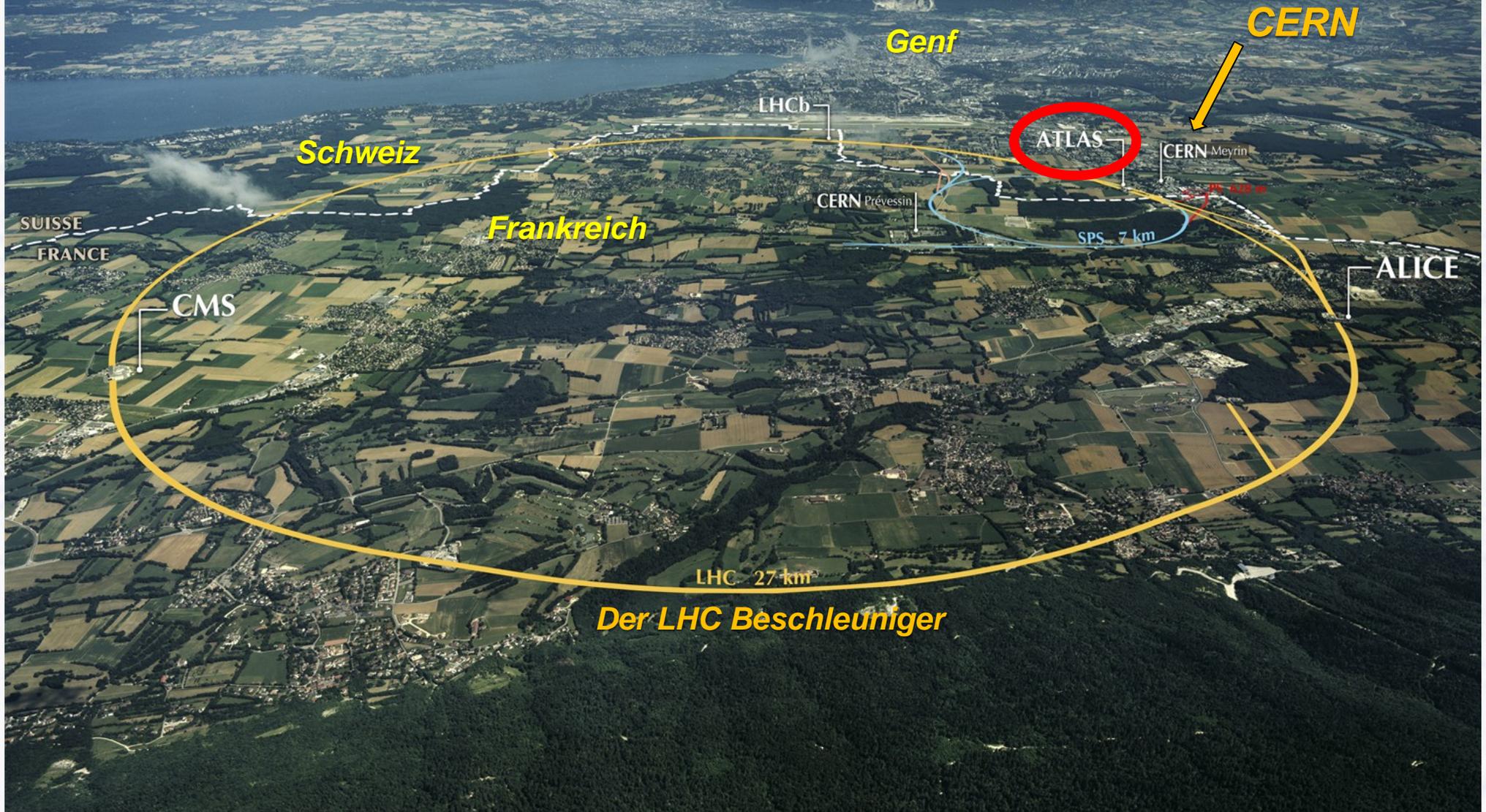


# Masterclasses

Auswertung von **echten** Daten des **ATLAS** Detektors



# Teilchenphysik Masterclasses

- Finden statt an Schulen, an Universitäten oder in Schülerlaboren

→ Schüler werden zu “Wissenschaftlern für einen Tag“

- Dauer ca. 5 Stunden

→ Vorträge über Teilchenphysik, Detektoren

- meist durch Doktoranden

→ **Messung mit echten LHC-Daten**

**HEUTE**

- **Analyse von aufgezeichneten Bildern der Kollisionen**

→ Teilchenphysik-Quiz

→ bei **international** Masterclasses

- Videokonferenz (eine Stunde) mit CERN und anderen gleichzeitig teilnehmenden Masterclasses (weltweit)

- >10'000 Schüler aus 42 Ländern im März/April 2015



# Heutiges Ziel (Übersicht)

## ● Messungen einer Masterclass durchführen (ATLAS W-path)

### → Ins Innere des Protons schauen

- Finden und Zählen von W-Zerfällen

### → Suche nach dem Higgs-Teilchen

- Wie kann man Higgs-Teilchen finden

## ● Dazu nötig

### → Sichten von Bildern aufgezeichneter Proton – Proton Kollisionen

- Umgang mit dem Event Display

### → Teilchen im Detektor **identifizieren**

- Typische Teilchenarten finden (Elektronen, Myonen, Neutrinos)

### → Kollisionereignisse **klassifizieren**

- Ereignisse mit Zerfall eines W-Teilchens, mit zwei W-Teilchen...

- Bei 2 W-Teilchen: Messung des Winkels zwischen geladenen Leptonen

### → Ergebnisse in **Tabelle** eintragen

### → Endergebnis erhalten und diskutieren



# Aufbau der Materie

## ● Heutiges Wissen: Materie hat eine hierarchische Struktur

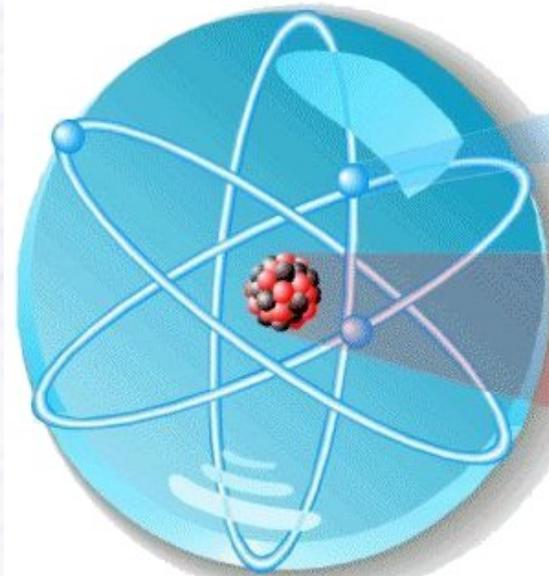
→ nur **Elektronen** und **Quarks** sind elementar (“punktförmig“)

### Atom:

Philosophisch: Demokrit, 4. Jh. vor Christus  
Theoretisch/Experimentell: Einstein/Perrin,  
Erklärung/Messung der Brown'sche Bewegung, 1905

### Elektron:

J.J. Thomson, Kathodenstrahlen, 1897



atom  $\sim 10^{-8}$  cm



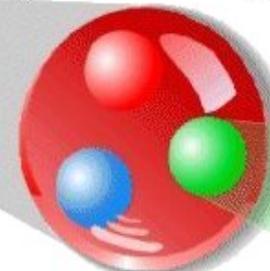
electron  
 $< 10^{-16}$  cm



nucleus  
 $\sim 10^{-12}$  cm

proton  
(neutron)

Proton: Rutherford, 1919  
Neutron: Chadwick, 1932



$\sim 10^{-13}$  cm

quark  
 $< 10^{-16}$  cm

### Atomkern:

Rutherford, Streuung von  
 $\alpha$ -Teilchen (Heliumkernen)  
an Goldatomen, 1910

### Quark-Modell:

Gell-Mann, Zweig, 1964

# Struktur des Protons

- Protonen sind (noch) komplizierter

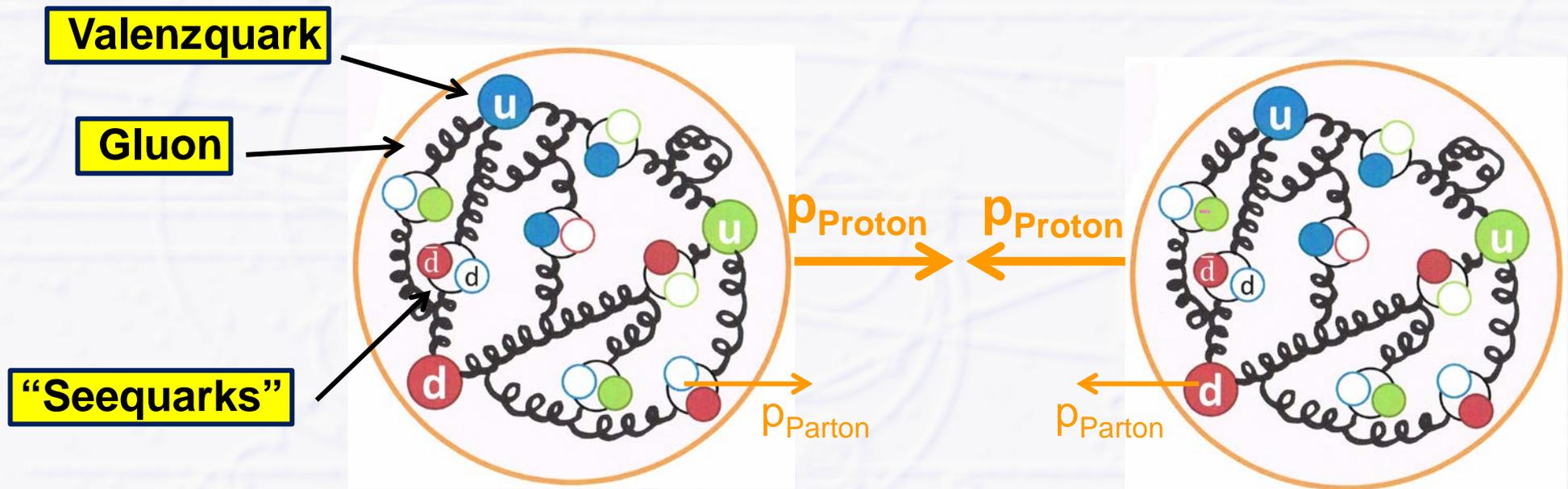
  - 3 **Valenzquarks** (uud) mit unterschiedlicher Farbladung

  - (Viele) **Gluonen** als Austauscheteilchen der starken Wechselwirkung

  - (Viele) **“Seequarks”** = kurzzeitig entstehende Quark – Antiquark Paare

- Nur die **“Partonen”** der Protonen kollidieren

Quark – Quark, Gluon – Gluon, Quark – Gluon, Antiquark – Gluon, Quark - Antiquark



# Vakuumfluktuationen

## Das Vakuum ist nicht leer!

→ Heisenberg'sche Unschärferelation:  $\Delta x \cdot \Delta p \geq h$

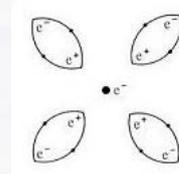
- Ort und Impuls eines Teilchens können nicht gleichzeitig mit beliebiger Genauigkeit bestimmt werden

→ aber auch:  $\Delta E \cdot \Delta t \geq h$

- für eine kurze Zeit  $\Delta t$  kann die Energie  $\Delta E$  aus dem Vakuum "geborgt" werden

## Ursache für kurzzeitig auftauchende & verschwindende Teilchen – Antiteilchen Paare aus dem Vakuum

→ z.B. Abschirmung der Elektronladung

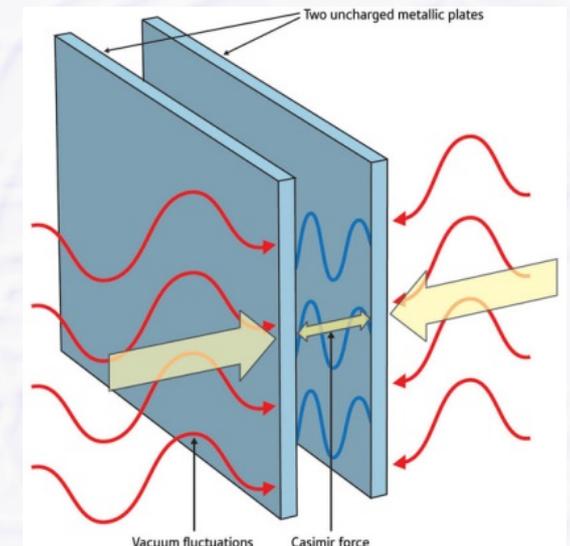
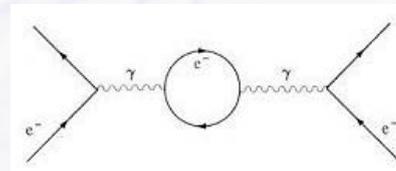


→ Messbar durch Casimir-Effekt

- äußerer Druck auf 2 Metallplatten mit kleinem Abstand
- nicht alle Moden passen zwischen die Platten
- Wellencharakter der Teilchen!

## Das Vakuum ist kompliziert!

- viele zusätzliche Beiträge, z.B. Schleifen

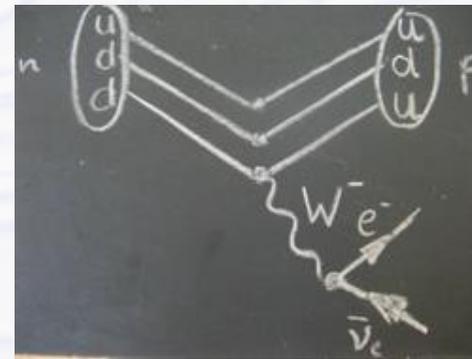
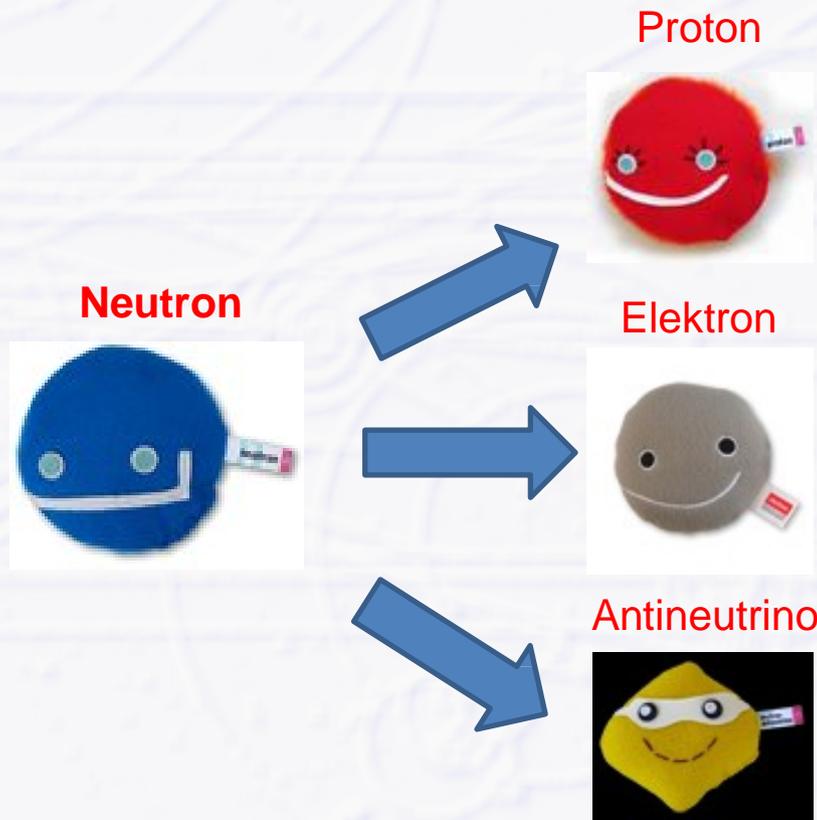


# Welche Valenzquarks sind im Proton?

- Wie können wir etwas über die Anzahl oder das **Verhältnis von u und d Quarks** erfahren?

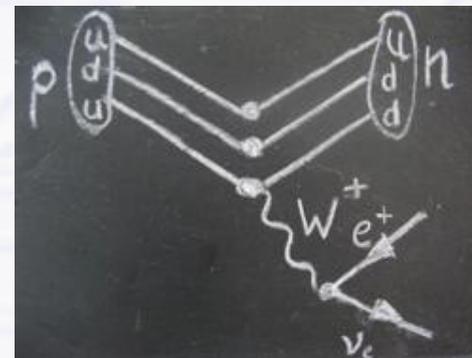
→ Beispiel: Beta-Zerfall

im Quark-Bild:



normaler Beta-Zerfall  
Neutron  $\rightarrow$  Proton:

$$d \rightarrow u + W^-$$



inverser Beta-Zerfall  
("Zeitumkehr")  
Proton  $\rightarrow$  Neutron:

$$u \rightarrow d + W^+$$

Je nach Quark im Anfangszustand  
entsteht ein  $W^+$  oder ein  $W^-$

# Das W-Boson

- (geladenes) Austauscheteilchen der schwachen Wechselwirkung

Drei Generationen der Materie (Fermionen)

|          | I   | II                                    | III                                  |  |
|----------|---|---------------------------------------|--------------------------------------|--|
| Masse →  | 2,4 MeV                                   | 1,27 GeV                              | 171,2 GeV                            | 0                                      |
| Ladung → | $\frac{2}{3}$                             | $\frac{2}{3}$                         | $\frac{2}{3}$                        | 0                                      |
| Spin →   | $\frac{1}{2}$                             | $\frac{1}{2}$                         | $\frac{1}{2}$                        | 1                                      |
| Name →   | <b>u</b><br>up                            | <b>c</b><br>charm                     | <b>t</b><br>top                      | <b>γ</b><br>Photon                     |
| Quarks   | 4,8 MeV                                   | 104 MeV                               | 4,2 GeV                              | 0                                      |
|          | $-\frac{1}{3}$                            | $-\frac{1}{3}$                        | $-\frac{1}{3}$                       | 0                                      |
|          | $\frac{1}{2}$                             | $\frac{1}{2}$                         | $\frac{1}{2}$                        | 1                                      |
|          | <b>d</b><br>down                          | <b>s</b><br>strange                   | <b>b</b><br>bottom                   | <b>g</b><br>Gluon                      |
| Leptonen | <2,2 eV                                   | <0,17 MeV                             | <15,5 MeV                            | 91,2 GeV                               |
|          | 0   | 0                                     | 0                                    | 0                                      |
|          | $\frac{1}{2}$                             | $\frac{1}{2}$                         | $\frac{1}{2}$                        | 1                                      |
|          | <b>ν<sub>e</sub></b><br>Elektron-Neutrino | <b>ν<sub>μ</sub></b><br>Myon-Neutrino | <b>ν<sub>τ</sub></b><br>Tau-Neutrino | <b>Z<sup>0</sup></b><br>schwache Kraft |
|          | 0,511 MeV                                 | 105,7 MeV                             | 1,777 GeV                            | 80,4 GeV                               |
|          | -1  | -1                                    | -1                                   | $\pm 1$                                |
|          | $\frac{1}{2}$                             | $\frac{1}{2}$                         | $\frac{1}{2}$                        | 1                                      |
|          | <b>e</b><br>Elektron                      | <b>μ</b><br>Myon                      | <b>τ</b><br>Tau                      | <b>W<sup>±</sup></b><br>schwache Kraft |

Eichbosonen

- Wichtige Prozesse mit schwacher Wechselwirkung (und W-Bosonen)

→ Kernfusion (z.B. in der Sonne)

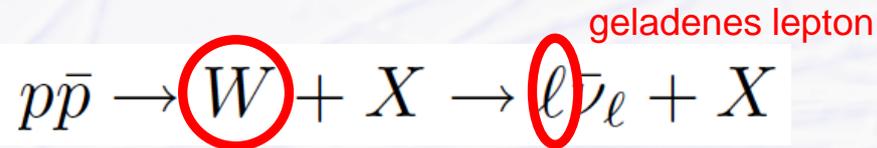
- inverser Beta-Zerfall: H → He

→ Radioaktive Zerfälle

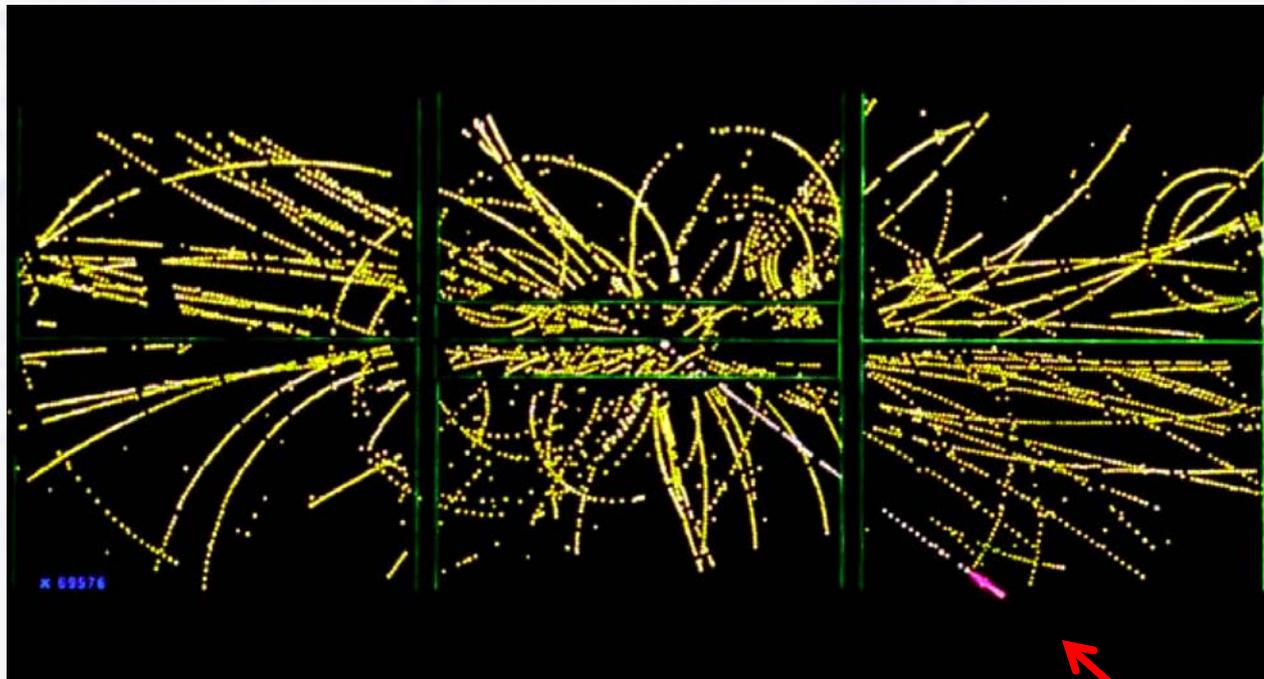
- Erwärmung des Erdinnern
- Altersbestimmung (<sup>14</sup>C Methode)
- Medizin:
  - Szintigraphie
  - Positronen-Emissions-Tomographie (PET)

# Direkte Entdeckung des $W$ und $Z^0$

- **SppS collider am CERN 1983** (Nobelpreis 1984, C. Rubbia + S. van der Meer)
  - Super Proton Synchrotron betrieben als Proton – Antiproton Collider
  - 2 Experimente/Detektoren: UA1 + UA2 (Underground Area 1 + 2)



Kollision im  
UA1 Spurdetektor



hochenergetisches Elektron

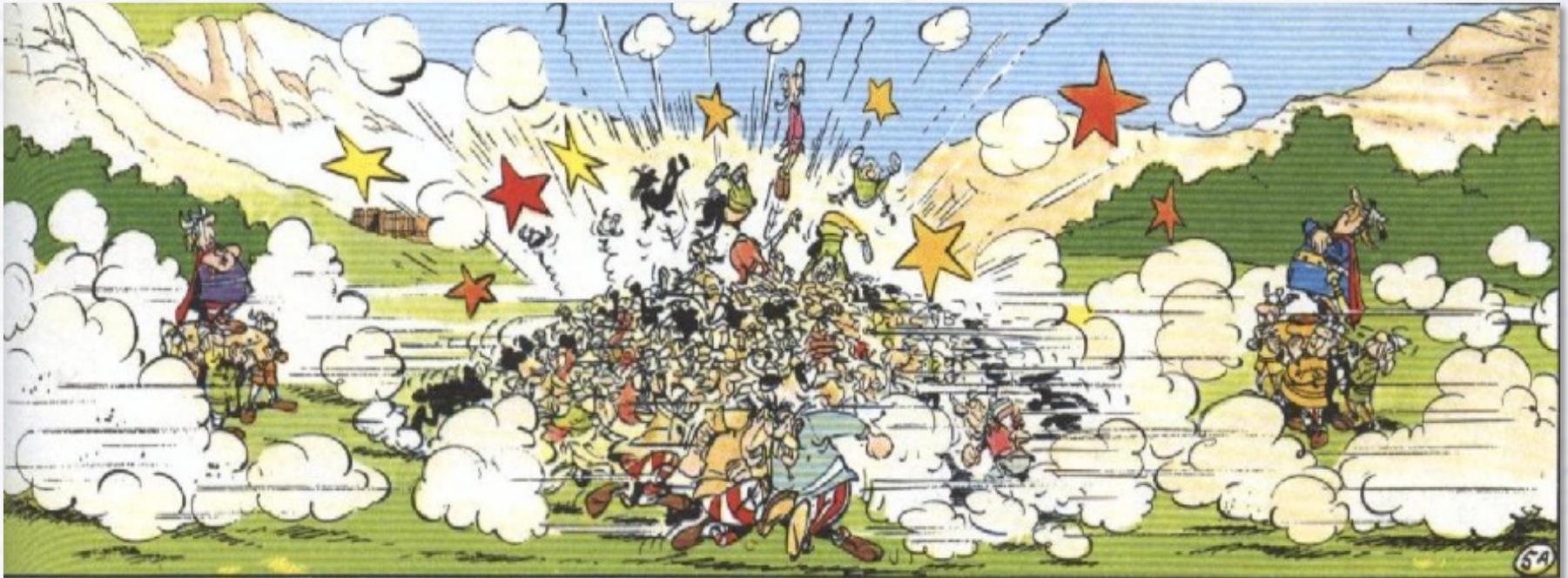
# Messung 1: Das Innere des Protons

- Bestimme das **Verhältnis von u und d Quarks im Proton** aus der Anzahl der gefundenen W-Bosonen

→ erwartet für Protonen (uud) bei Kollisionen der Valenzquarks:

$$\frac{u}{d} = \frac{W^+}{W^-} = \frac{2}{1}$$

→ aber leider kollidieren nicht nur die 3 Valenzquarks miteinander...



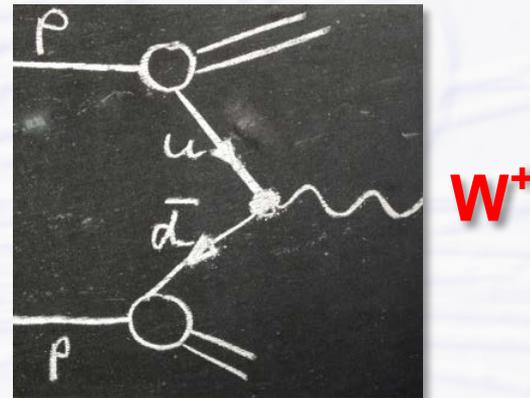
# Produktion von W-Bosonen am LHC

## ● Hauptprozesse für die Produktion von W-Bosonen

→ **Quark – Antiquark** Annihilation (~2/3 der Gesamtproduktion)

Valenzquark  
oder  
Seequark

Seequark

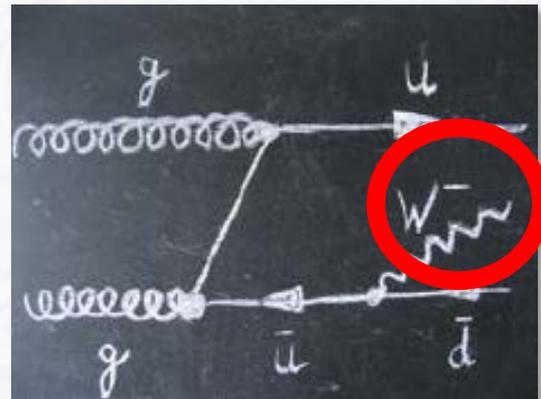
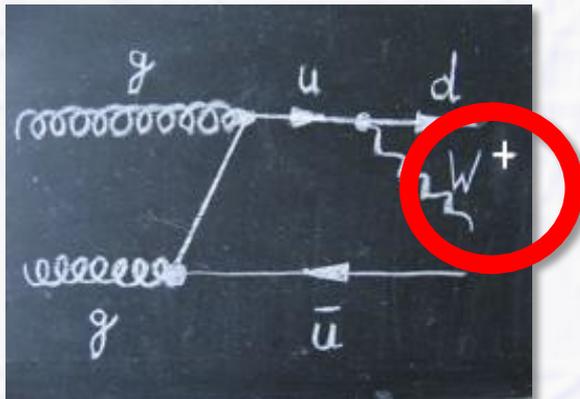


→ **Glukon – Glukon** Fusion (~1/3 der Gesamtproduktion)

◦ gleiche Produktionsraten von  $W^+$  und  $W^-$

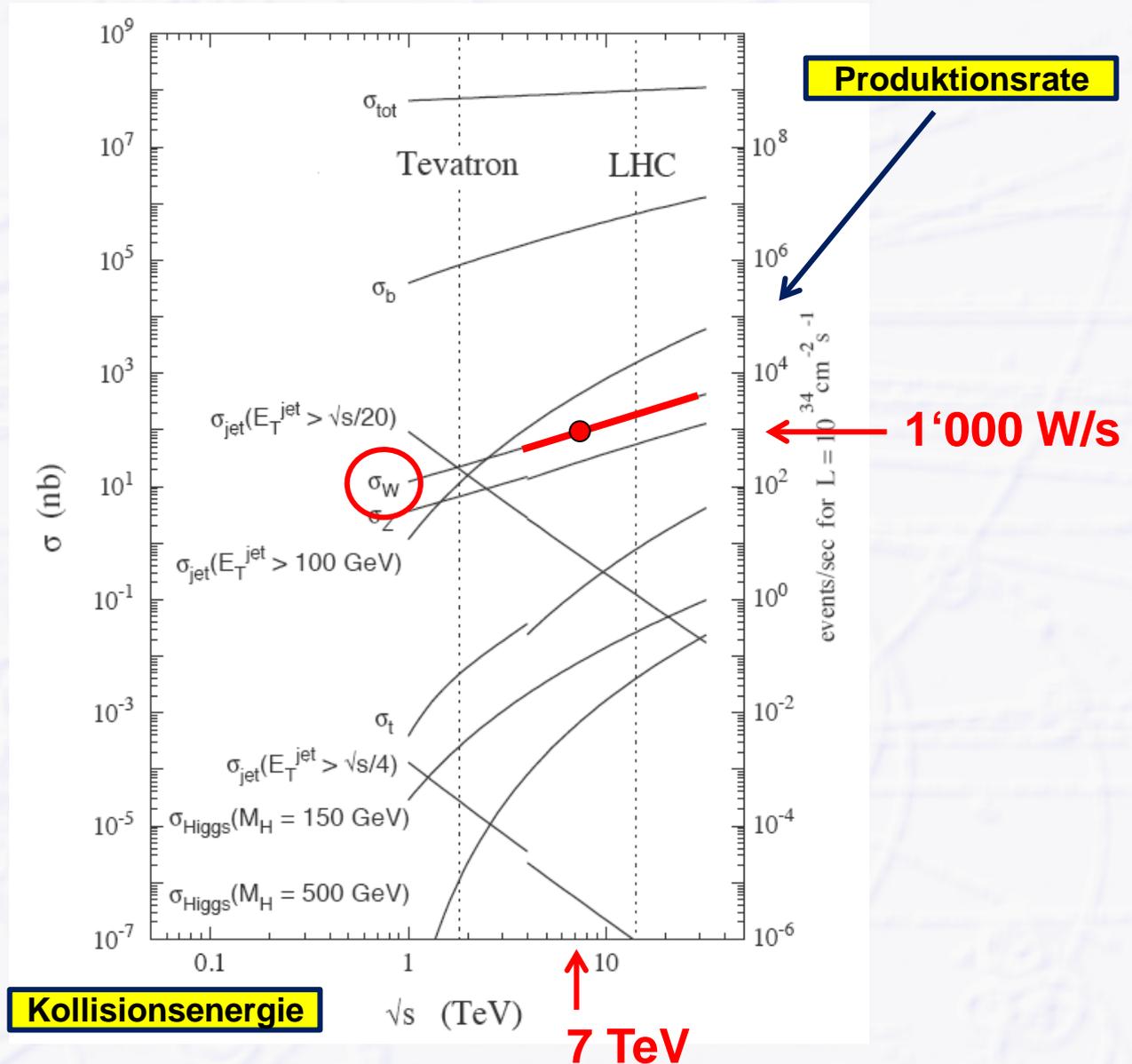


Wir erwarten  
als Verhältnis:  
 $\frac{W^+}{W^-} < 2$



# W-Bosonen Produktionsrate

- In 10 Stunden ATLAS Datennahme werden 10 Millionen W-Bosonen produziert
  - kein Mangel an Statistik
  - Seit Beginn der ATLAS Datennahme wurden ca.  $3 \times 10^9$  W-Bosonen produziert
- ABER: W-Bosonen zerfallen sofort nach der Erzeugung



# W-Boson Zerfälle

$\sim 2/3$

$\sim 1/3$

~~Quark – Antiquark Paar~~

geladenes Lepton +  
entsprechendes Neutrino

gleiche Zerfallswahrscheinlichkeiten

Jets aus vielen Spuren im Detektor,  
zusammen mit Jets aus anderen Reaktionen  
→ schlechte Unterscheidbarkeit

$1/3$

$1/3$

$1/3$

$e, \nu_e$        $\mu, \nu_\mu$

~~$\tau, \nu_\tau$~~

● **W Lebensdauer:  $\approx 3 \times 10^{-25}$  s**

● **Masse:  $80.39 \pm 0.02$  GeV/c<sup>2</sup>**

● **Zerfallsanteile in %:**

→ **hadronisch: 67.6%**

→ **leptonisch: 32.4%**

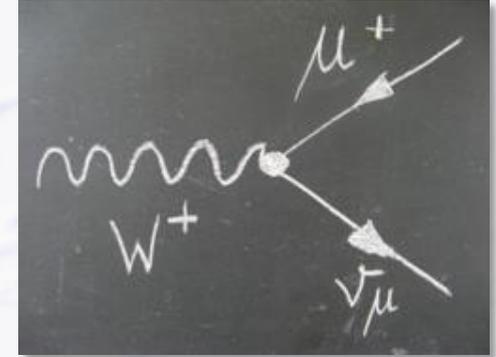
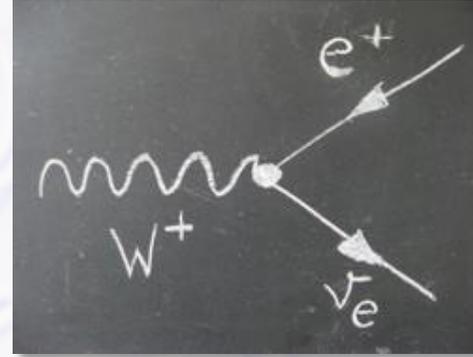
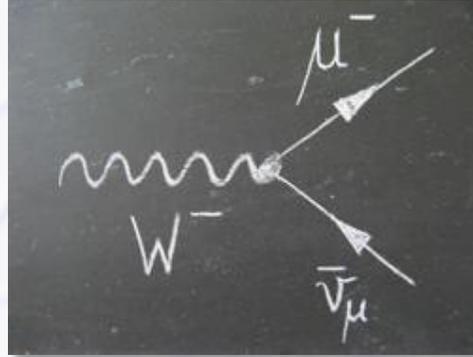
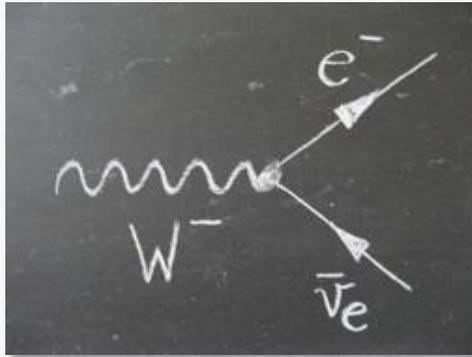
○ **davon in **e** oder  **$\mu$** : 21.3%**

**Elektron oder Myon  
und Neutrino im Detektor**

~~schneller Zerfall  
des Tau in andere  
Teilchen → schlecht  
nachweisbar~~



# Übersicht $W$ -Zerfälle für die Messung



- Genau **ein hochenergetisches**, elektrisch geladenes Lepton

- Myon (bzw. Antimyon) oder Elektron (bzw. Positron)

- **$p_T > 20 \text{ GeV}/c$**  ( $p_T = \text{Transversalimpuls}$ )

- Elektrisch geladenes Lepton **isoliert** von Jets

- sonst stammt das Lepton evtl. aus dem Zerfall eines Teilchens im Jet

- Neutrinos sind nicht direkt sichtbar im Detektor

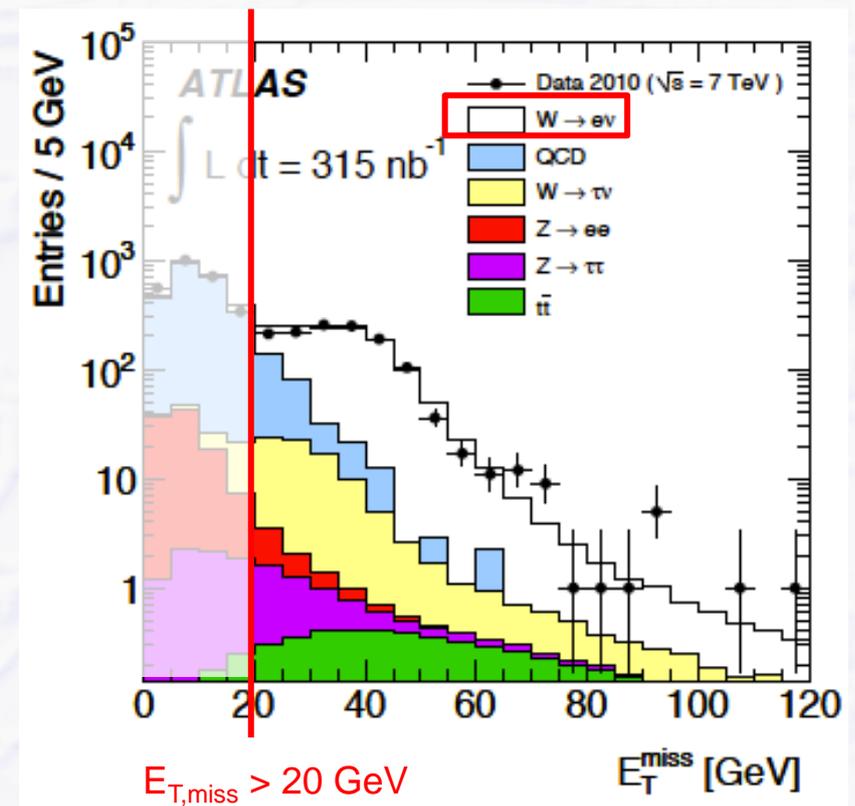
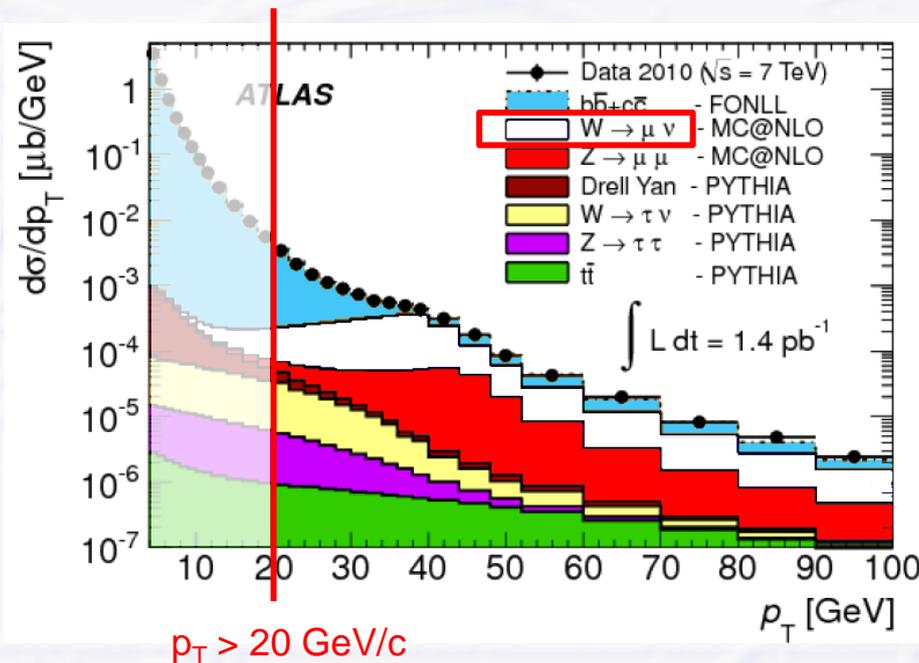
- ABER: verraten sich durch **fehlende Energie**

- **$E_{T,\text{miss}} > 20 \text{ GeV}$**  ( $E_{T,\text{miss}} = \text{fehlende transversale Energie}$ )

- Energie wird durch das Neutrino fortgetragen, die in der Energiebilanz fehlt

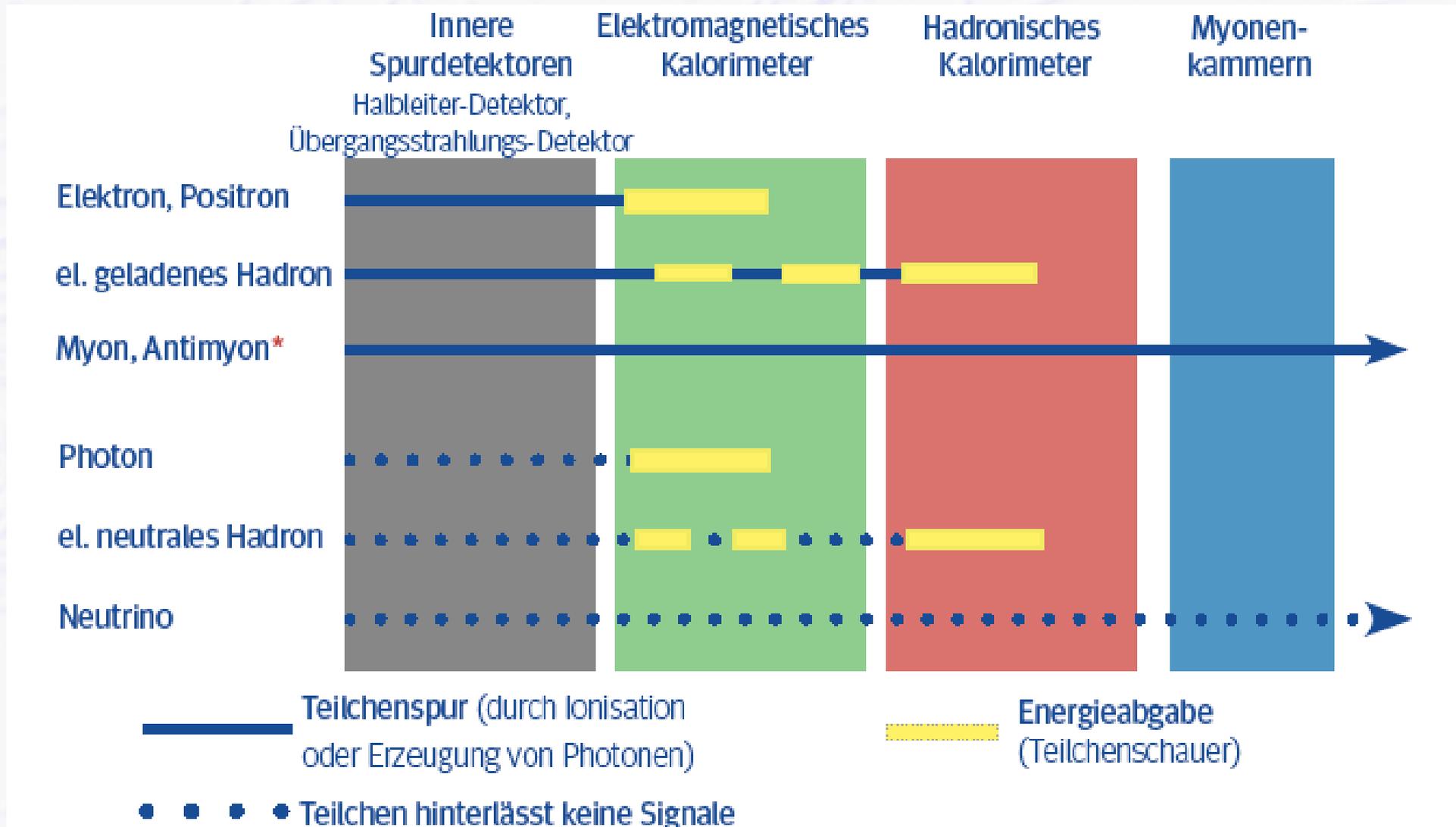
# Motivation der Auswahlkriterien

- $p_T > 20 \text{ GeV}/c$  ( $p_T$  = Transversalimpuls)
- $E_{T,\text{miss}} > 20 \text{ GeV}$  ( $E_{T,\text{miss}}$  = fehlende transversale Energie)
- Unterdrückung möglichst vieler konkurrierender Prozesse ohne W-Zerfall bei gleichzeitig möglichst hoher Selektionseffizienz für Leptonen aus W-Zerfällen

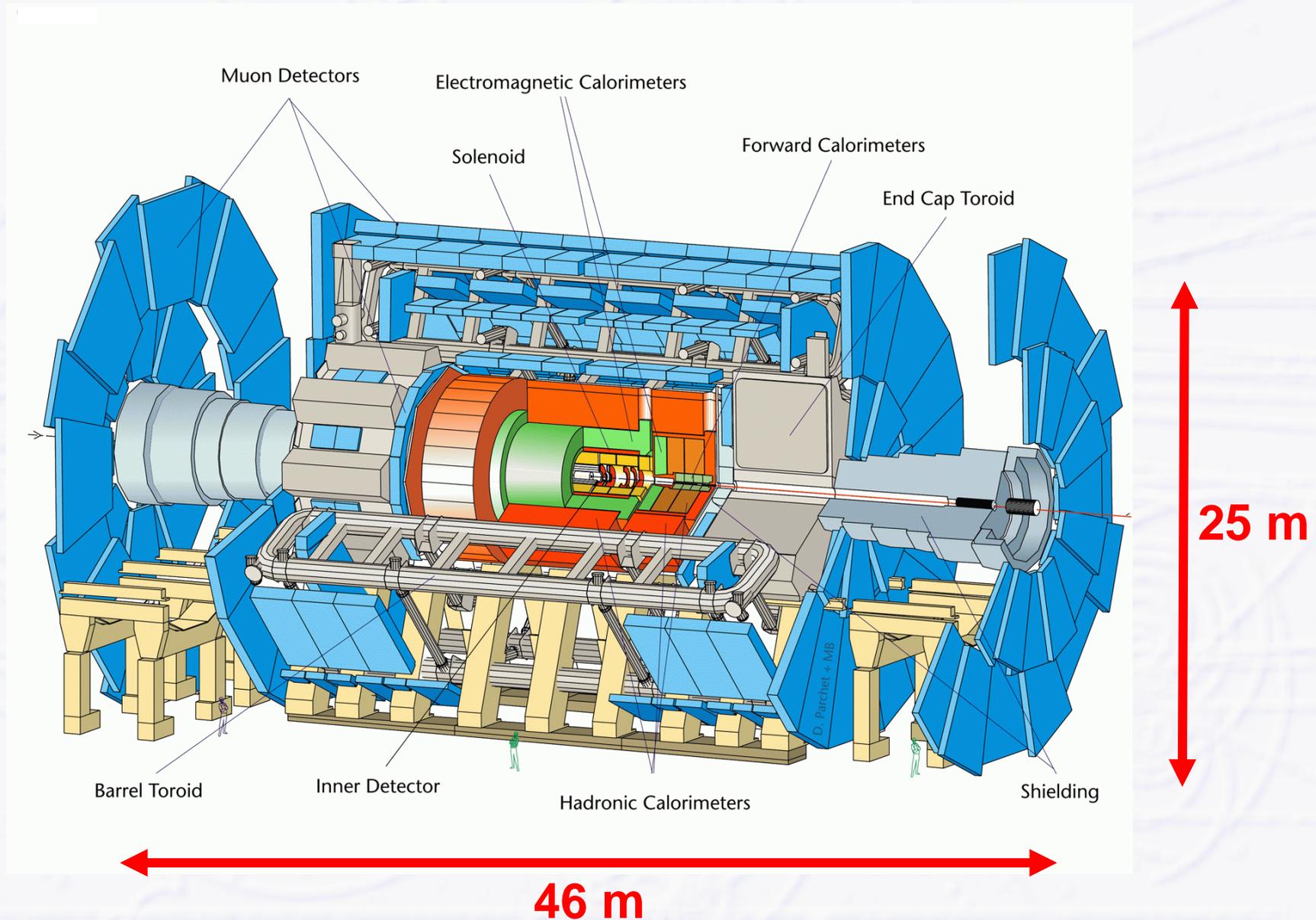


# Teilchen im Detektor

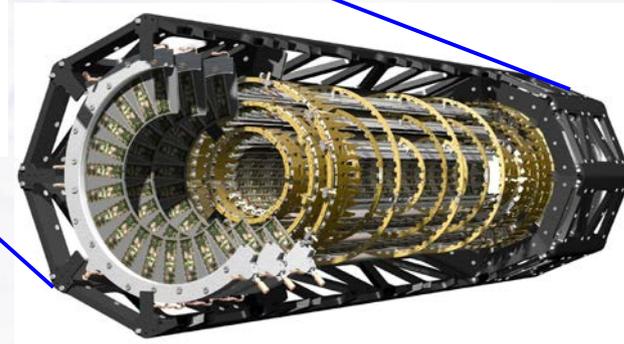
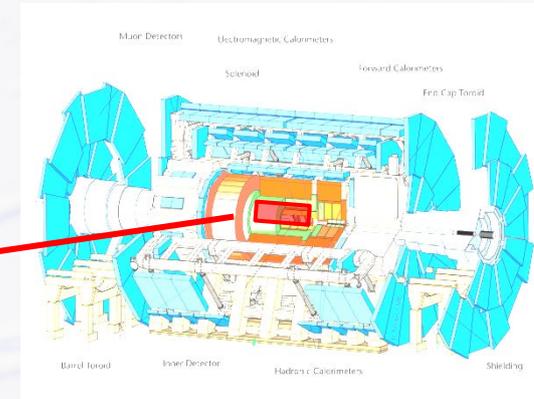
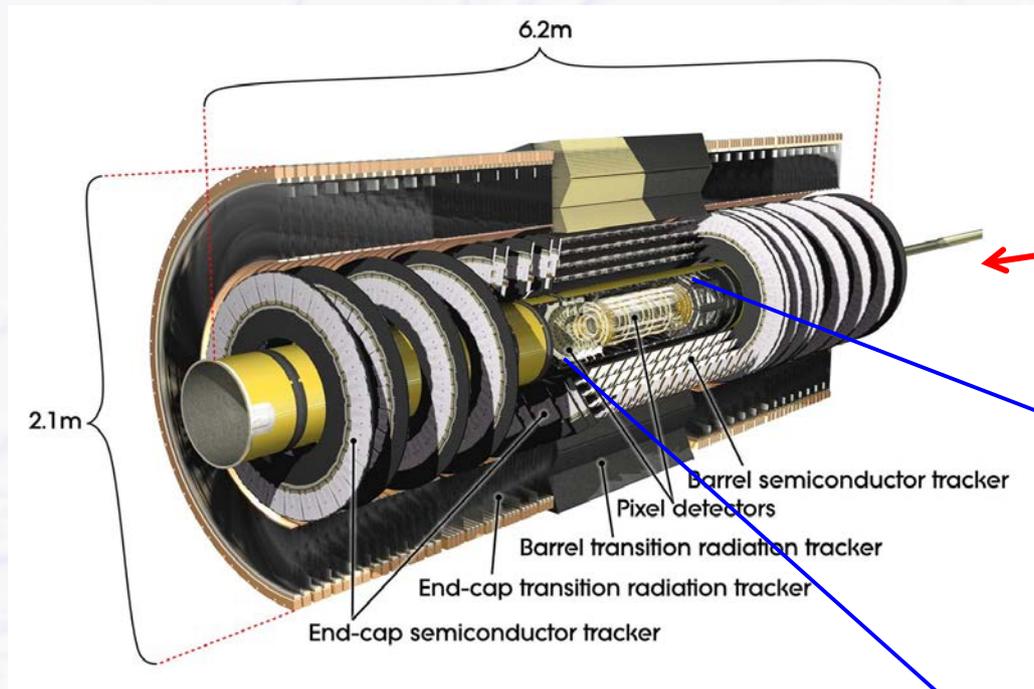
- Teilchen hinterlassen eine typische Signatur im Detektor



# ATLAS (A Toroidal LHC ApparatuS)



# ATLAS Inner Tracker (Spurdetektor)



## 3 verschiedene Technologien

- Silizium-Pixel (3 Lagen)
- Silizium-Streifen (4 Lagen)
- gasgefüllte Röhrchen (36 Lagen)

## Impulsmessung von geladenen Spuren über Krümmung im Magnetfeld

- Transversalimpuls  $p_T [GeV/c] = 0.3 \times B [T] \times r [m]$

# Kalorimeter (Energiesmessung)

## 2 verschiedene Kalorimeterarten

### → elektro-magnetisches Kalorimeter (ECAL)

- Energiemessung von **leichten Teilchen mit elektro-magnetischer Wechselwirkung**: Elektronen, Positronen, Photonen
- andere Teilchen hinterlassen nur wenig oder keine Energie

### → hadronisches Kalorimeter (HCAL)

- Energiemessung von **schweren Teilchen mit starker Wechselwirkung**: Pionen, Kaonen, Protonen, Neutronen

### → KEINE direkte Energiemessung möglich von

- **Myonen** (**schwer, aber keine starke Wechselwirkung**)  
Nachweis und Impulsmessung im Myondetektor, Impuls + Myon ID → Myonenergie
- **Neutrinos** (**keine Wechselwirkung mit Detektormaterial**)  
indirekter Nachweis über fehlende transversale Energie

# ATLAS Kalorimeter (ECAL)

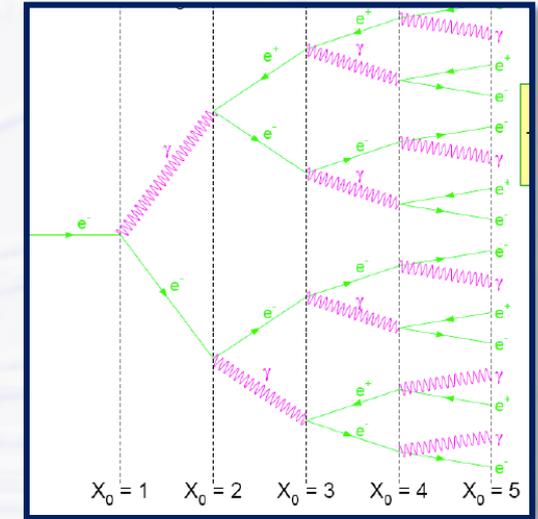
## Entstehung eines elektro-magnetischen Schauers aus Elektronen, Positronen und Photonen

→ ausgelöst durch

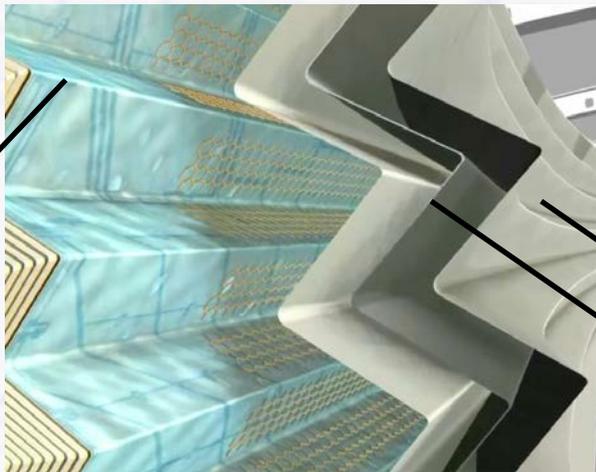
- **Bremsstrahlung** im starken elektrischen Feld von schweren Kernen  $\sim Z^2/m^2$  (Elektronen, Positronen)
- Elektron – Positron **Paarbildung** im Kernfeld (Photonen)

→ Ionisation von Flüssig-Argon durch Schauerteilchen

- **Gesamtladung  $\approx$  Energie des Anfangsteilchens**

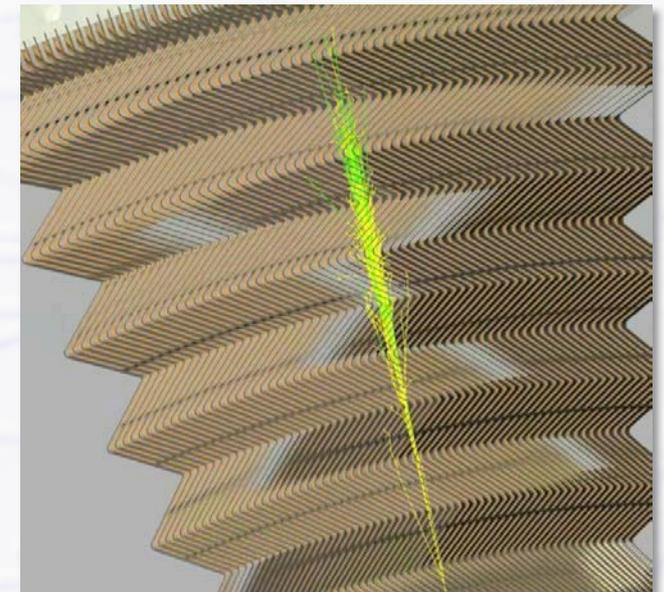


el.-magn. Schauer (schematisch)



Flüssiges Argon  
(-185 °C)

Blei, Stahl



el.-magn. Schauer (Detektor Simulation)

# ATLAS Myon Detektor

## ● Myondetektoren sind **Spurdetektoren**

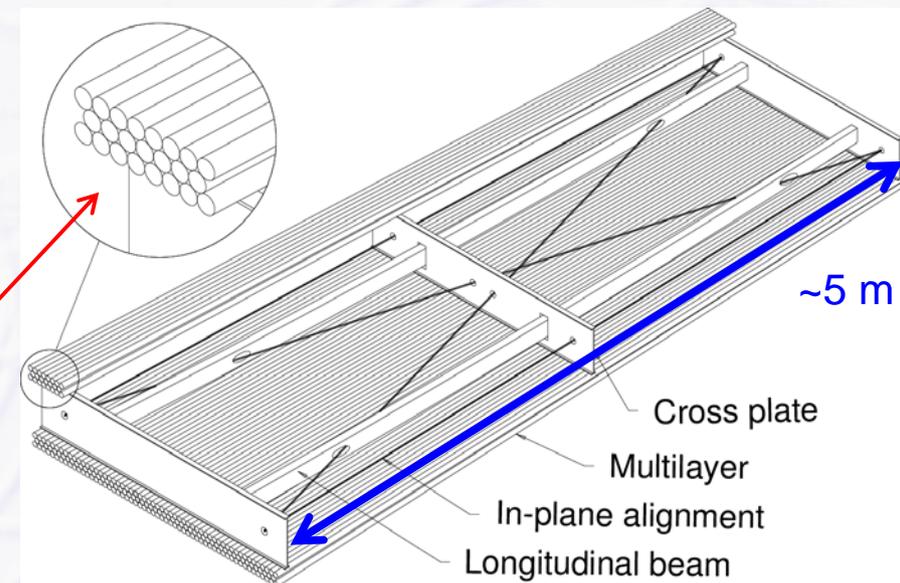
- bilden die äußeren Lagen der LHC Detektoren
- sind **nicht ausschliesslich empfindlich für Myonen**
  - registrieren auch andere geladene Teilchen!
- **aber per “Definition”**
  - wenn ein Teilchen den Myon Detektor erreicht hat, wird es als Myon betrachtet
  - alle anderen Teilchen sollten im Kalorimeter absorbiert worden sein

## ● ATLAS

- 1200 Kammern mit 5500 m<sup>2</sup> Fläche
- gross-volumiges Magnetfeld
- erfordert präzise Karte des (inhomogenen) Magnetfelds

**Aluminiumrohre mit zentralem Draht gefüllt mit 3 bar Gas**

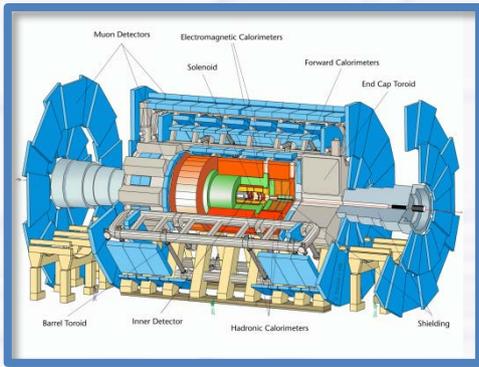
### ATLAS Myon Detektorelement



# Datenaufbereitung

## ● Datenfluss bei ATLAS

**echte** Detektordaten



**ODER**

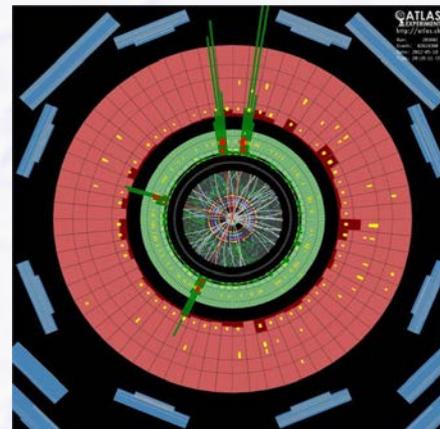
Simulations-  
Programm

**simulierte** Detektordaten

Rekonstruktion  
der Kollisionen

Datenspeicherung  
im weltweiten LHC  
Grid

**Event Display**



Visualisierung der Daten

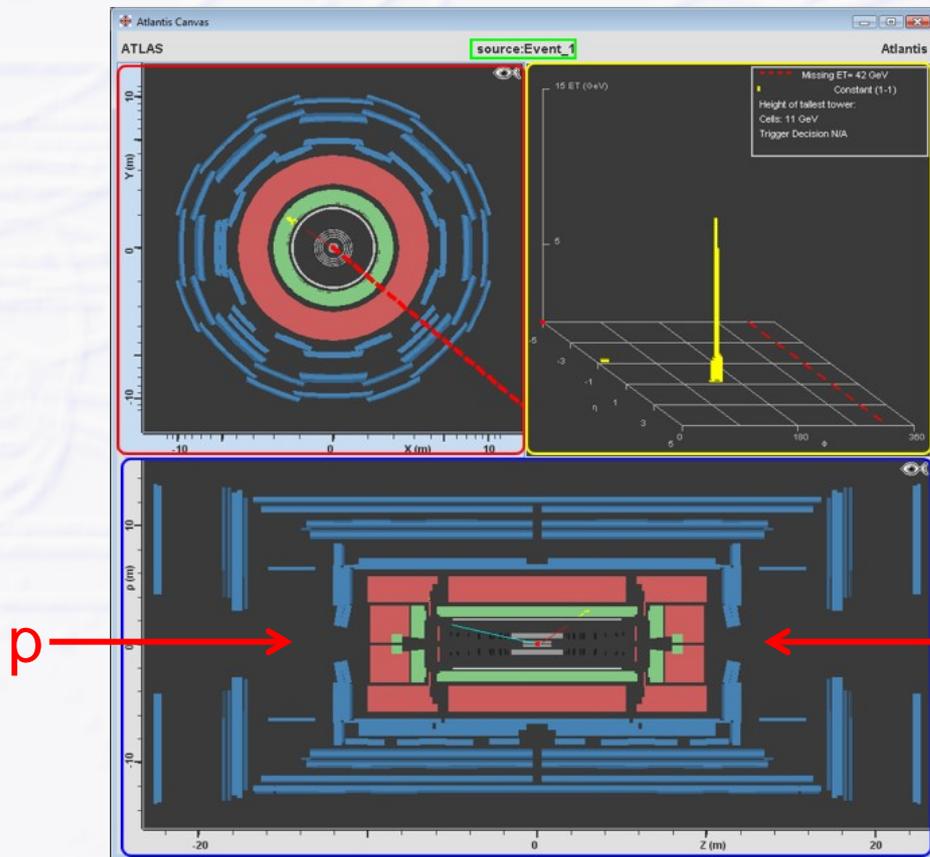
Analyseprogramm

# MINERVA

➔ **M**asterclass **I**nvolving **E**vent **R**ecognition **V**isualised with **A**tlantis

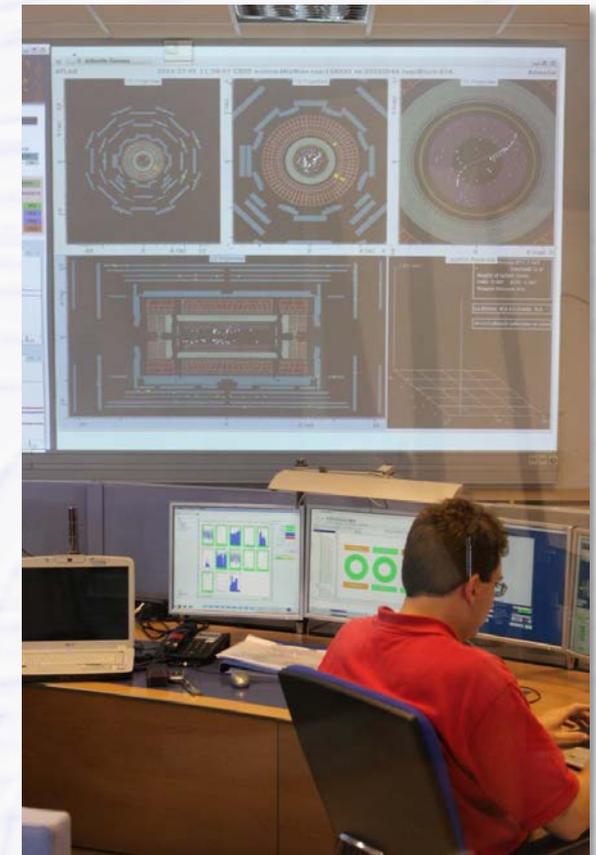
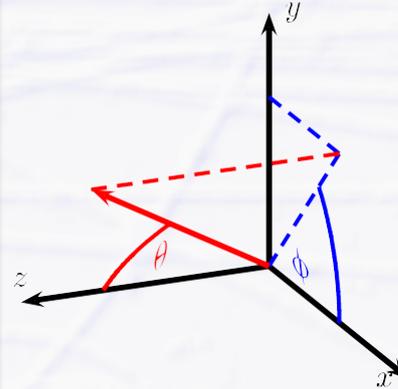
● **An die Masterclasses angepaßte Version des ATLAS Event Display Programms Atlantis**

Querschnitt



Seitenansicht

Energie in der Winkelebene



ATLAS Kontrollraum mit Atlantis Display

# Detektoransicht in MINERVA

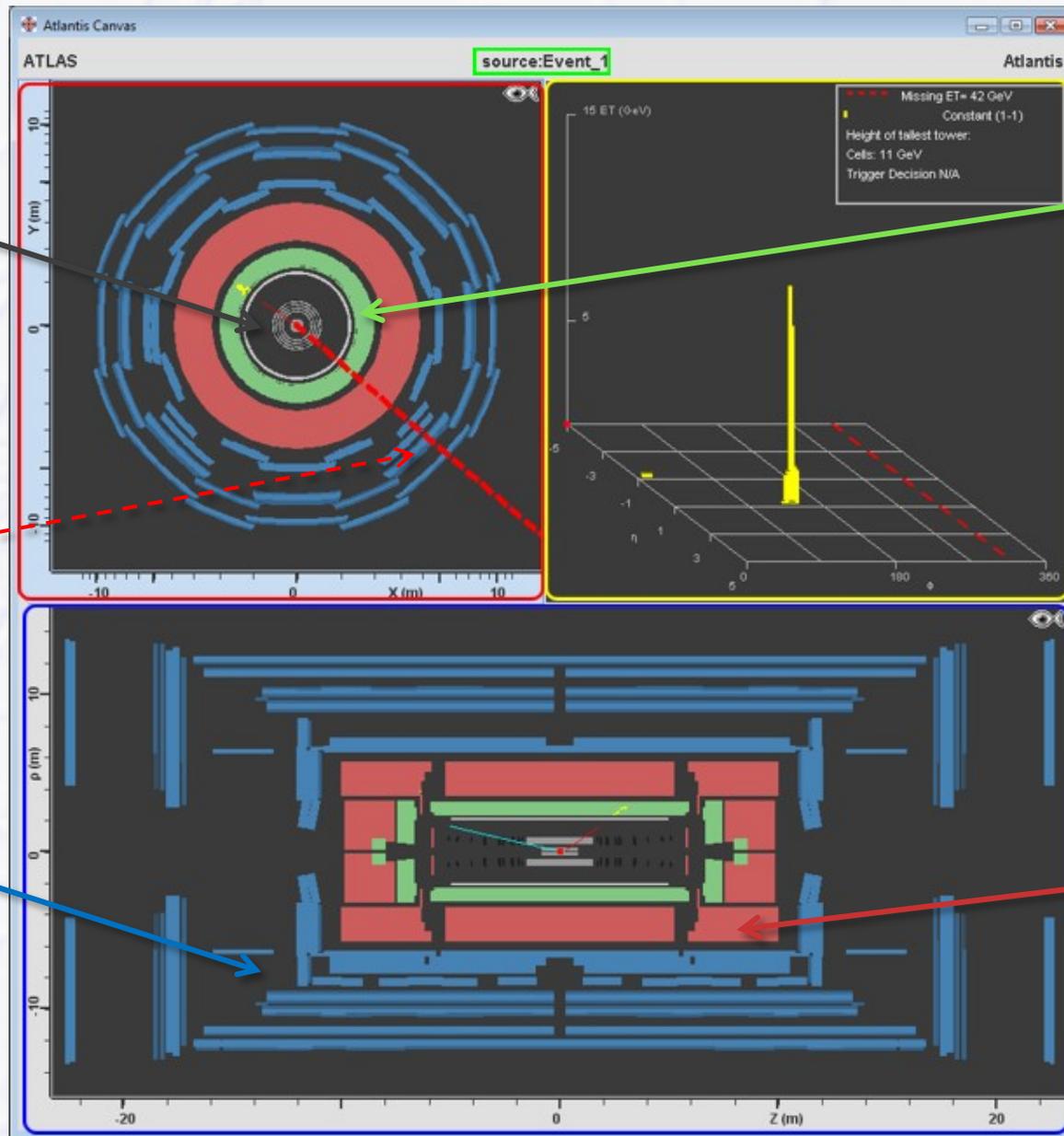
Spurdetektor

Richtung der  
fehlenden  
Energie

Myon Detektor

El.-magn.  
Kalorimeter  
(ECAL)

Hadronisches  
Kalorimeter  
(HCAL)



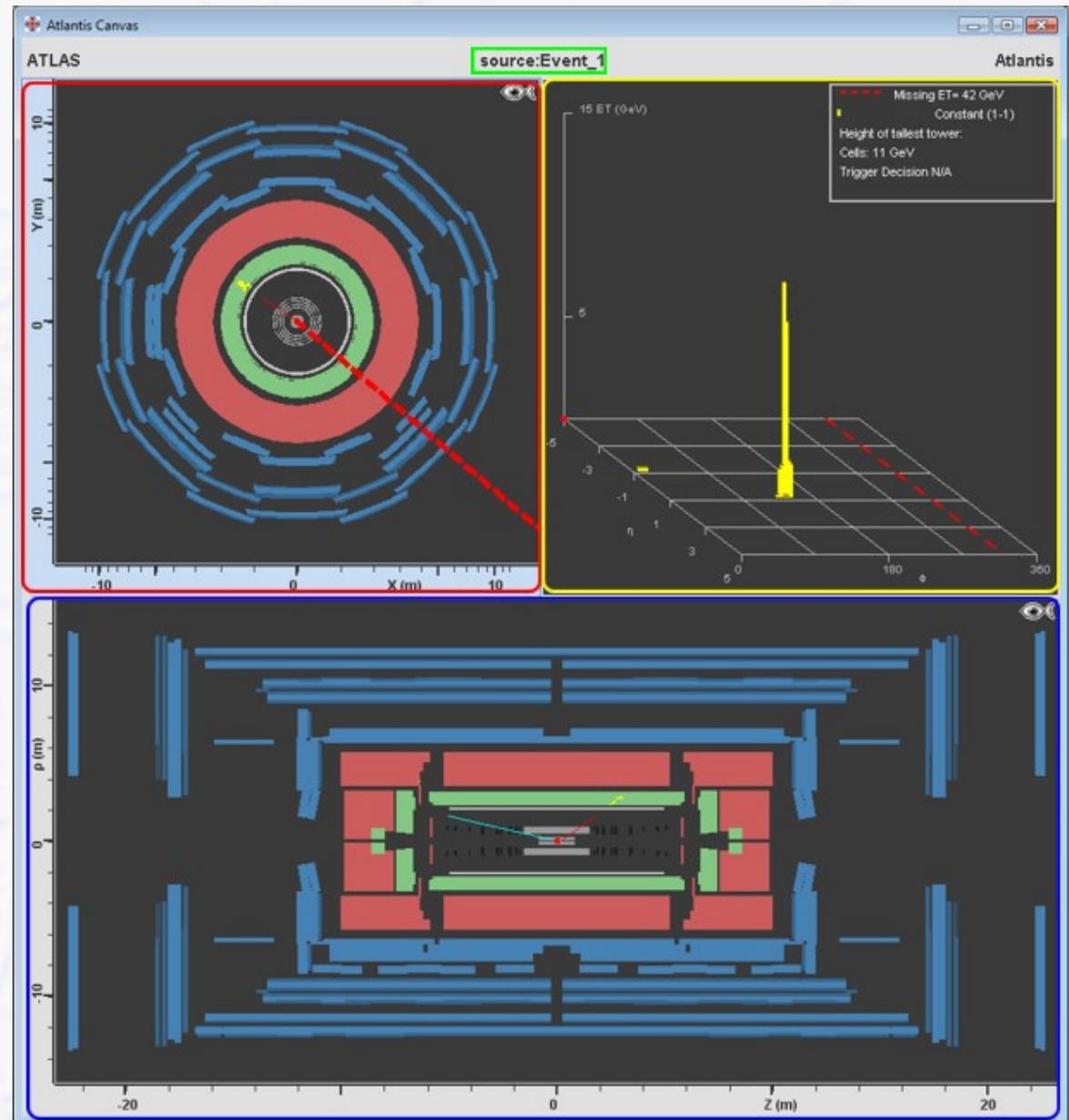
# Elektronen, Positronen, Photonen

## Elektronen, Positronen

- Spur im Spurdetektor
- Energie im **ECAL**
- keine Energie im **HCAL**
- keine Spur im **Myondet.**

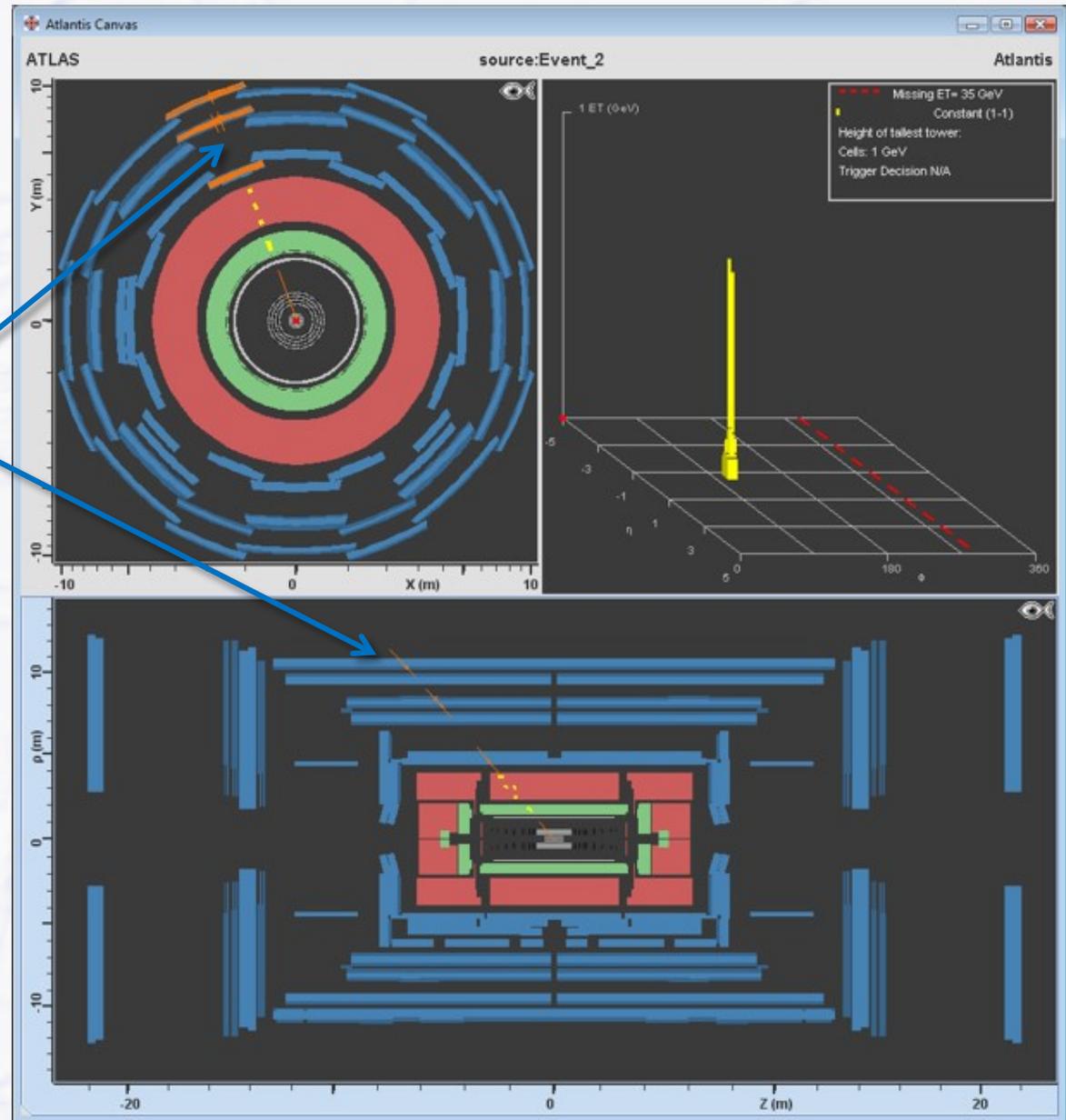
## Photonen

- keine Spur im Spurdetektor
- Energie im **ECAL**
- keine Energie im **HCAL**
- keine Spur im **Myondet.**



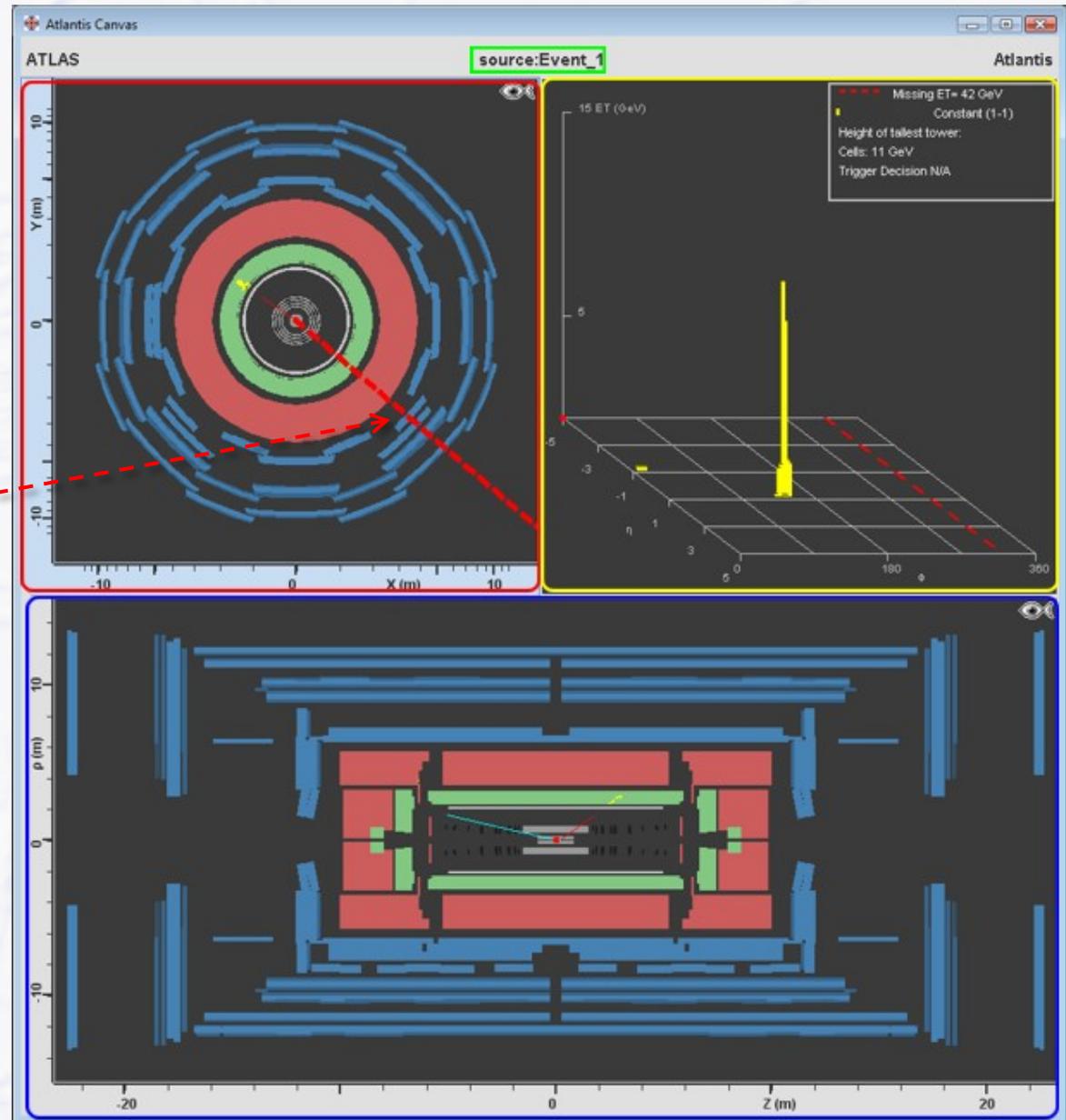
# Myonen, Antimyonen

- Spur im Spurdetektor
- wenig Energie im **ECAL**
- wenig Energie im **HCAL**
- Spur im **Myondetektor**



# Neutrinos

- keine Spur im Spurdetektor
- keine Energie im **ECAL**
- keine Energie im **HCAL**
- keine Spur im **Myondet.**
- **fehlende Energie**



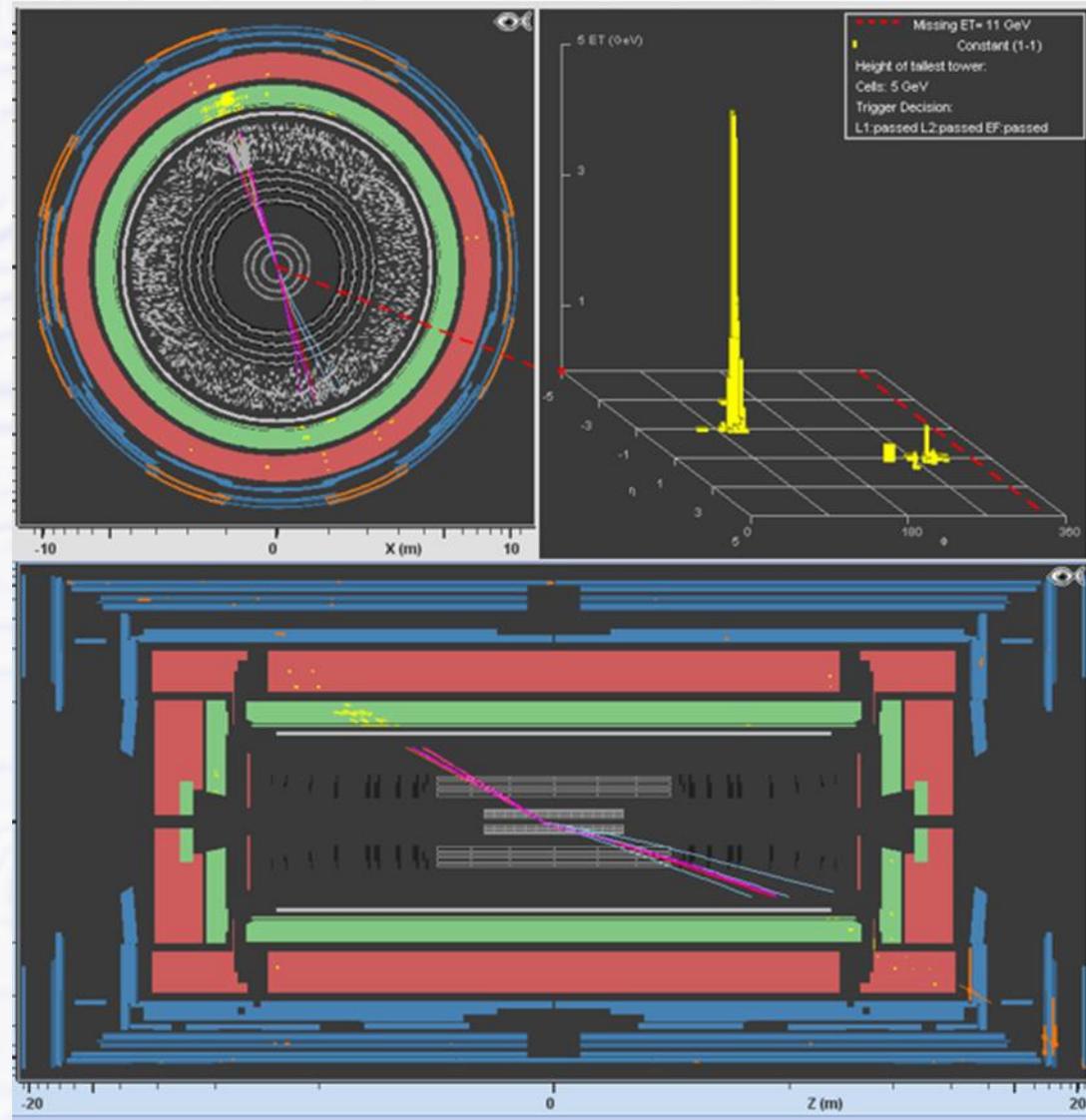
# Quarks, Anti-Quarks

- Quarks und Anti-Quarks sind **keine freie Teilchen**

- starke Wechselwirkung wird größer, wenn sich (Anti-) Quarks voneinander trennen
- kinetische Energie der (Anti-) Quarks wird in Produktion neuer Teilchen umgesetzt

- (Anti-)Quarks erzeugen **Teilchenbündel (Jets)**

- viele Spuren im Spurdetektor
- Energie im **ECAL + HCAL**
- keine Spuren im **Myonidet.**



# Zusatzinformationen

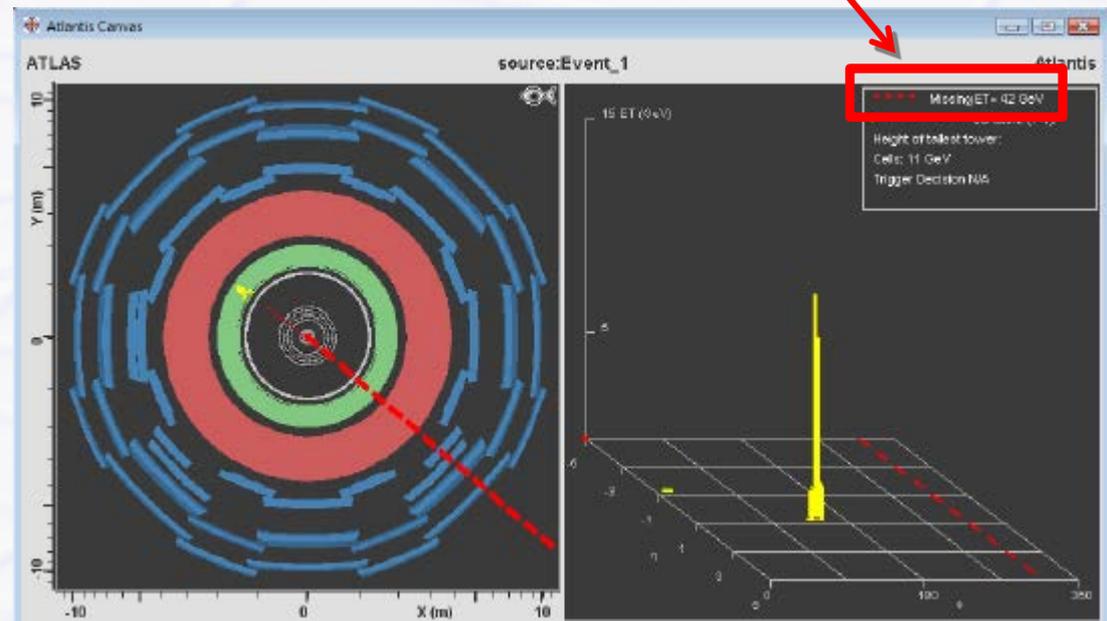
## ● Impuls ( $p_T$ ) und Ladung



Fehlende Energie  
(missing ET)

- Spurauswahl anklicken
- Auf die Spur des Teilchens klicken
- Infobox zeigt  $p_T$ , Ladung und weitere Informationen

```
InDetTrack index: 0  
PT=61,869 GeV  
 $\eta = -0,173$   
 $\Phi = 264,249^\circ$   
Px=-6,200 GeV  
Py=-61,558 GeV  
Pz=-52,738 GeV  
Charge = 1
```



# Vorbereitungen

## ● Computerzugang

- Benutzername: **teacherg**
- Passwort: **Einstein1879** (Geburtsjahr von Albert Einstein)

## ● Browser starten

- Chrome starten, die folgende Seite wird automatisch geladen  
(oder sollte automatisch geladen werden...)
- <http://www.cern.ch/kjende/de/wpath.htm>



# Übung 1

## ● Übung 1 zur **Teilchenidentifikation** (Webbrowser)

→ 4 (einfache) Ereignisse mit verschiedenen Teilchen

→ verschiedene Detailansichten zum Anklicken

Exercise 1: particle 1

Exercise 1: particle 2

Exercise 1: particle 3

Exercise 1: particles 4

Exercise 1: particle 1

ATLAS 2010-06-14 00:53:30 PDT source:atlas\_events:6\_FParticleID-jets (2+e906\_145319\_4443000) lum:Block\_439 ATLAS

In diesem Ereignis gibt es nur genau ein Teilchen, das sich nach rechts unten bewegt. Das Ereignis ist in der Seiten- und Querschnittsansicht dargestellt. Welches Teilchen ist das?

**Teilchen 1**

- Elektron
- Positron
- Myon
- Antimyon
- Neutrino/ Antineutrino
- Jet

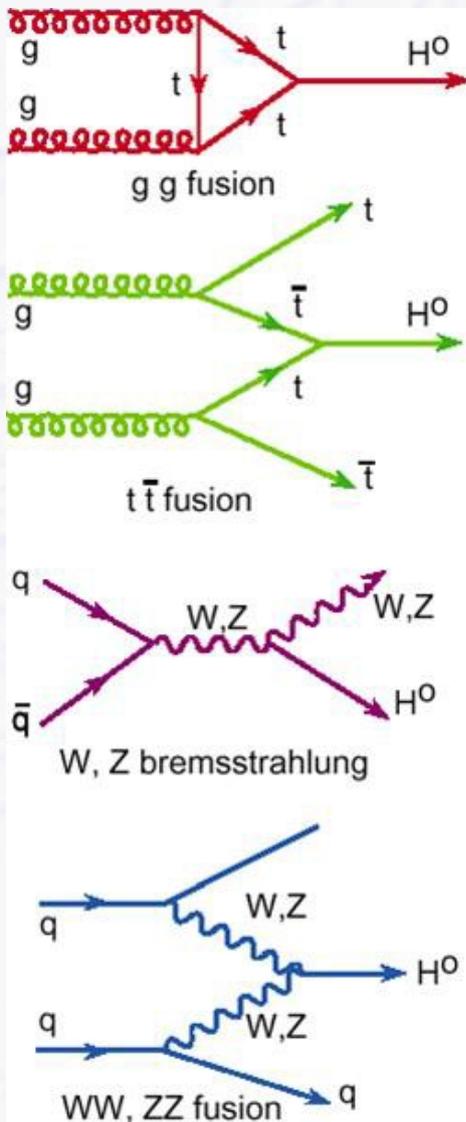
Check

Correct

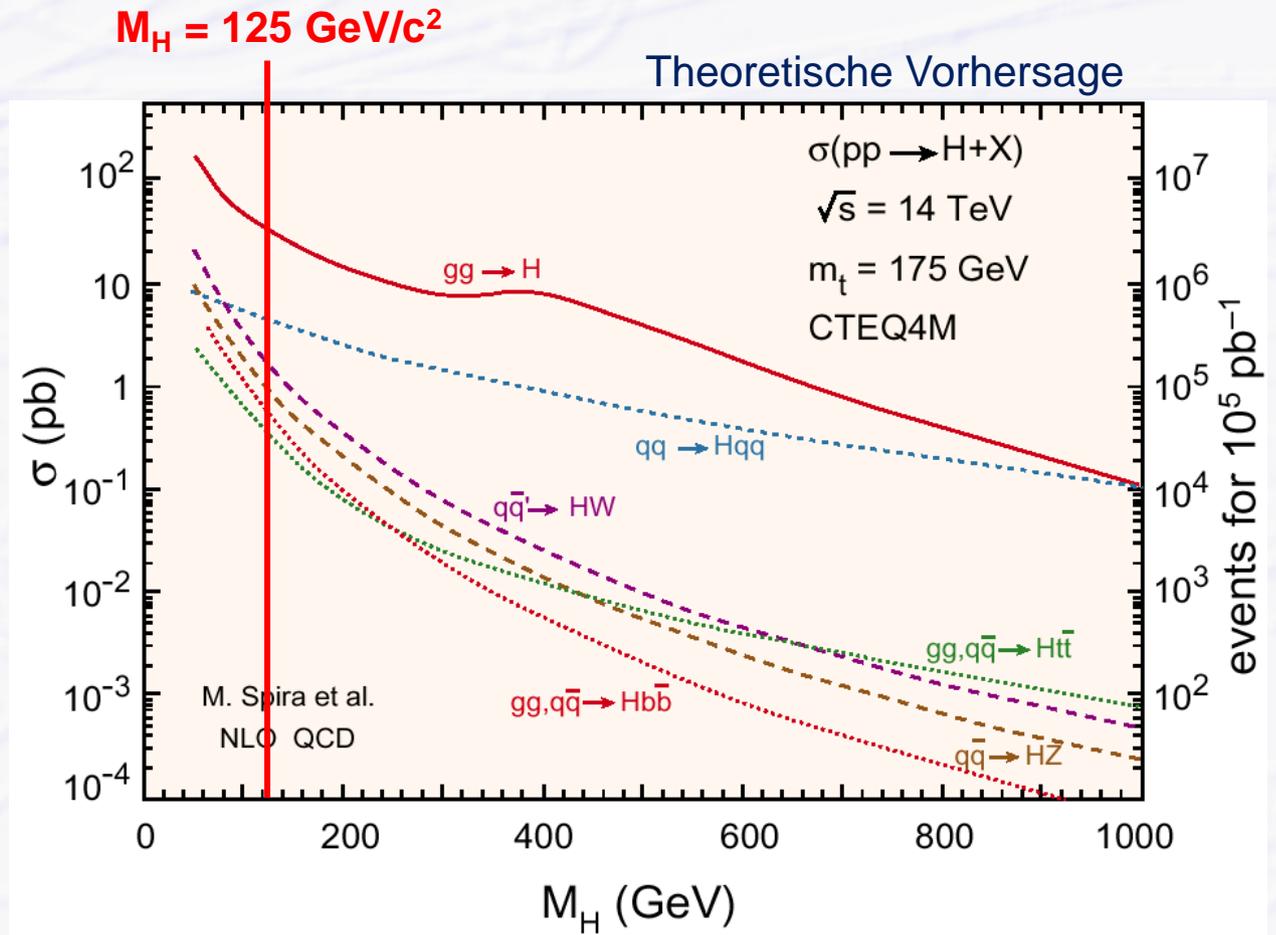
| Inhalt                        |
|-------------------------------|
| Ziele/Aufgaben                |
| <b>Teilchenidentifikation</b> |
| ATLAS-Detektor                |
| Event Display MINERVA         |
| Teilchen identifizieren       |
| <b>Übung 1</b>                |
| Ereignisidentifikation        |
| Messung                       |
| Auswertung                    |

# Higgs!

- Higgs-Teilchen werden am LHC über mehrere Wege erzeugt



Je nach Masse des Higgs-Teilchens sind die Produktionsraten verschieden



# Higgs Produktionsrate

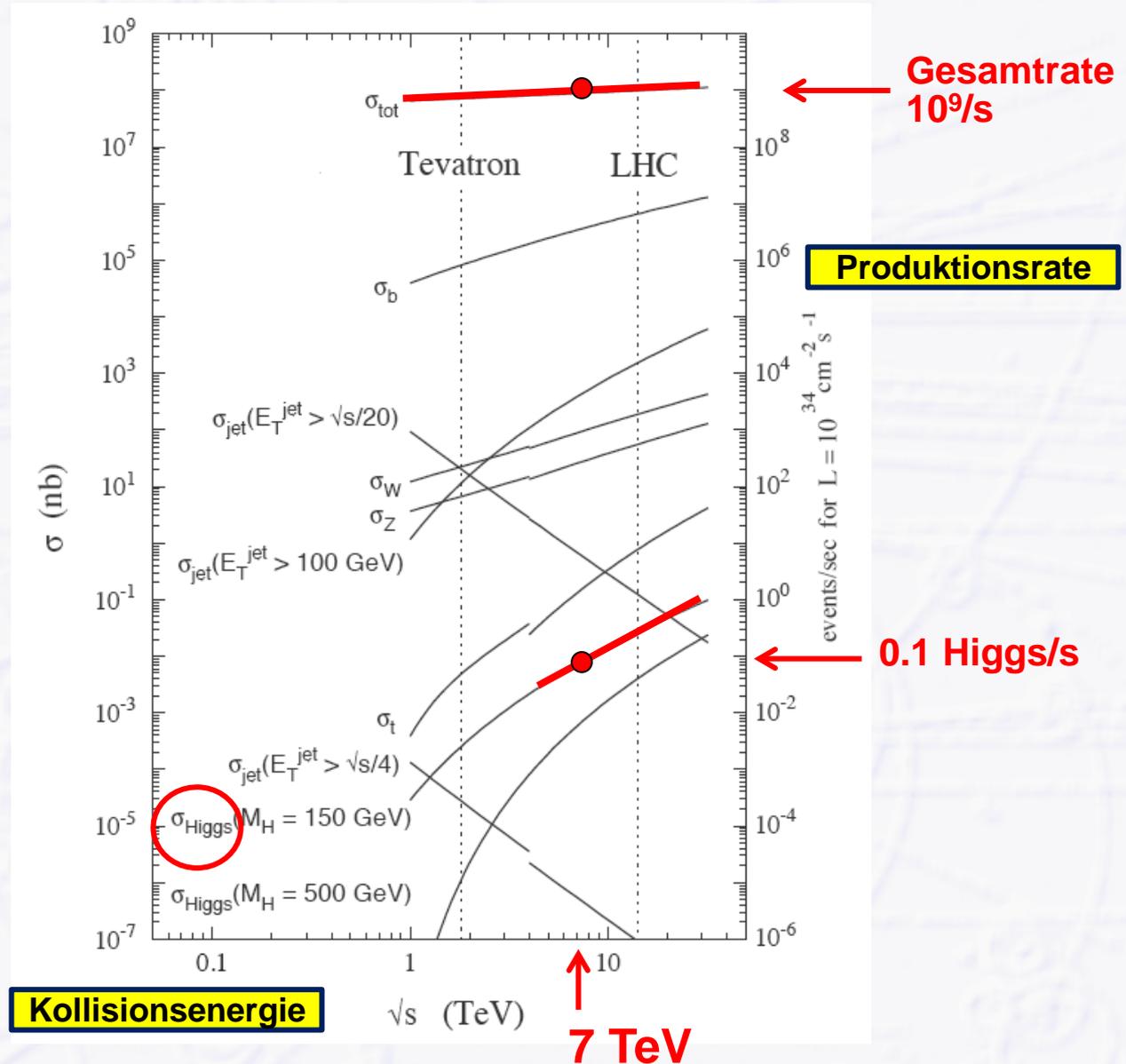
- **Produktionsrate:**  
~100 Higgs-Teilchen pro Stunde

→ Seit Beginn der ATLAS Datennahme wurden ca. 300'000 Higgs-Teilchen produziert

- **ABER: Higgs-Teilchen zerfallen sofort nach der Erzeugung**

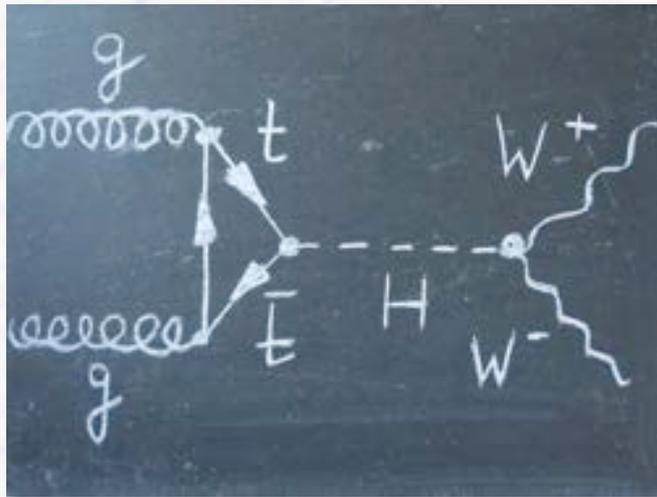
- nur wenige (seltene) Zerfallskanäle eignen sich zum Nachweis

→ nur ~1'000 Higgs-Teilchen wurden nachgewiesen



# Higgs Zerfälle

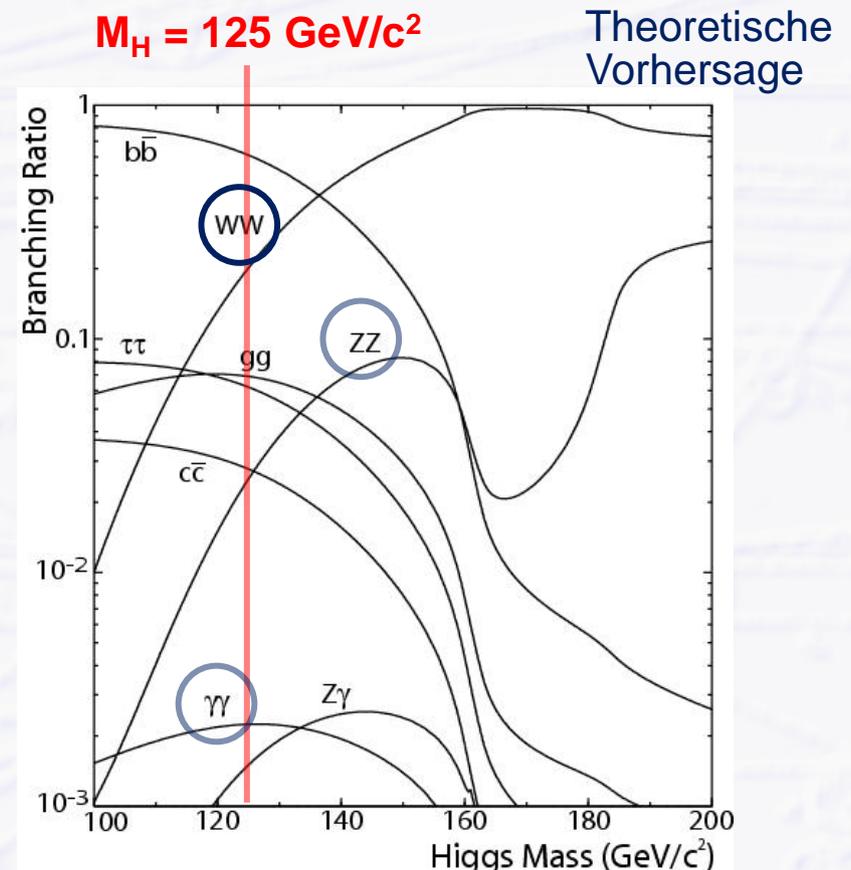
- Zerfälle in 2 W-Bosonen sind am häufigsten!



Je nach Masse des Higgs-Teilchens sind die Zerfallsverhältnisse verschieden

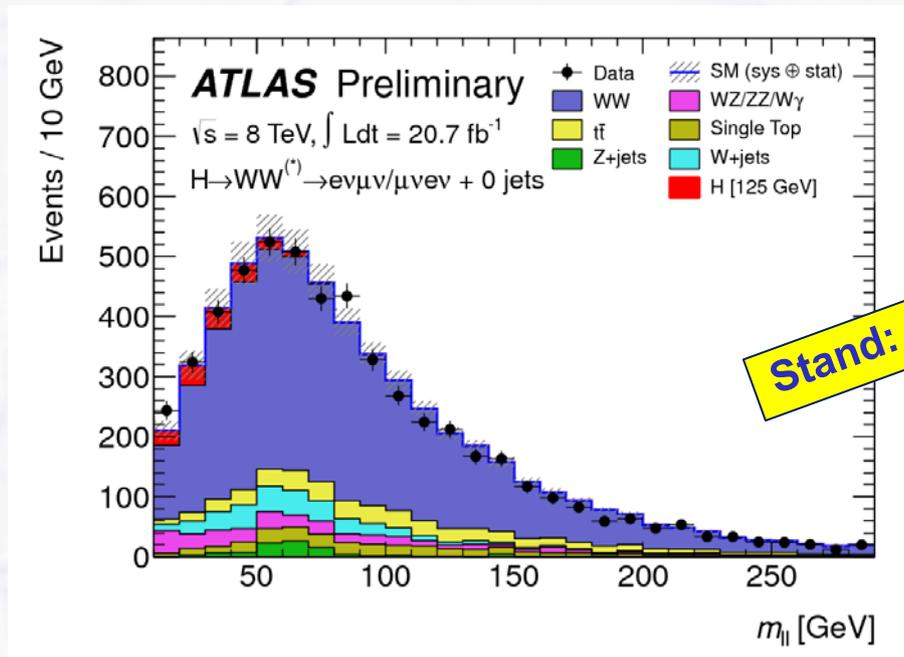
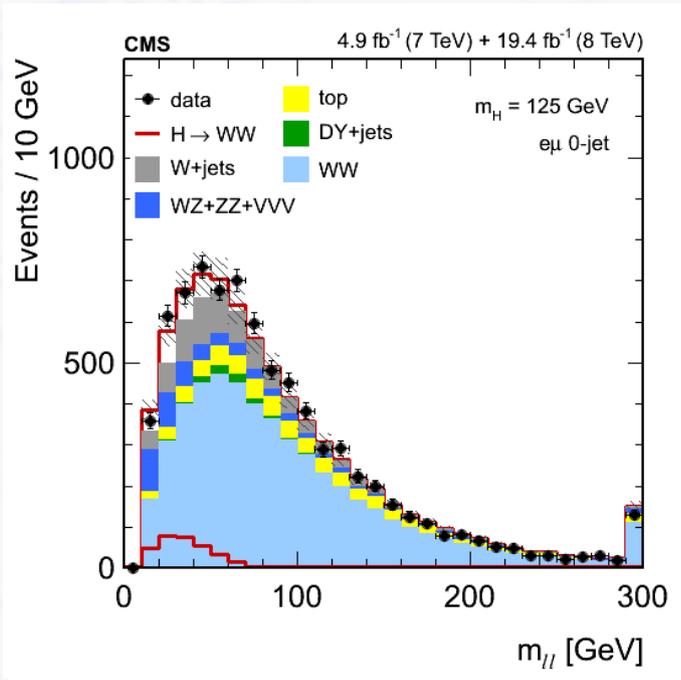
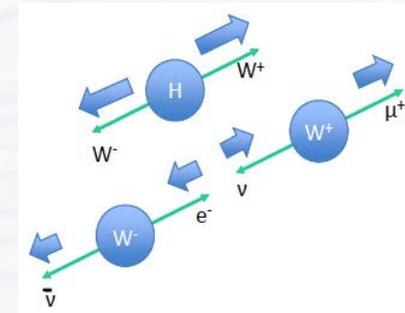
- **Echte Higgs-Kandidaten mit Zerfall in 2 W-Bosonen sind im Datensatz versteckt!**

→ aber nicht viele...



# $H \rightarrow WW$

- **Bester Zerfallskanal im Massenbereich 120 – 200 GeV**
- **Nur Leptonen im Detektor:  $l^+ \nu \ l^- \bar{\nu}$ ,  $l = (e, \mu)$** 
  - aber sehr viel schlechtere Massenauflösung ( $\sim 20$  GeV) als ZZ ( $\sim 2$  GeV)
  - fehlende Energie durch Neutrinos
- **Winkelkorrelationen helfen**
  - Leptons vom Higgs sind nah zusammen in  $\phi$



Stand: 16. Juni 2014

# Messung 2: Das Higgs suchen!

→ **2 W-Boson Zerfälle suchen!**

● **Genau zwei hochenergetische, elektrisch unterschiedlich geladene Leptonen**

→ 4 mögliche Kombinationen:  $\mu^+\mu^-$ ,  $e^+e^-$ ,  $\mu^+e^-$ ,  $\mu^-e^+$

→ **Transversalimpulse:  $p_{T,1} > 20 \text{ GeV}/c$ ,  $p_{T,2} > 10 \text{ GeV}/c$**

● **Kein oder maximal 1 Jet**

→ wenn 1 Jet: elektrisch geladene Leptonen **isoliert** von Jet

● **Fehlende Energie (durch 2 Neutrinos)**

→ wenn gleiche Lepton Familie ( $\mu^+\mu^-$ ,  $e^+e^-$ )

◦  **$E_{T,miss} > 40 \text{ GeV}$**

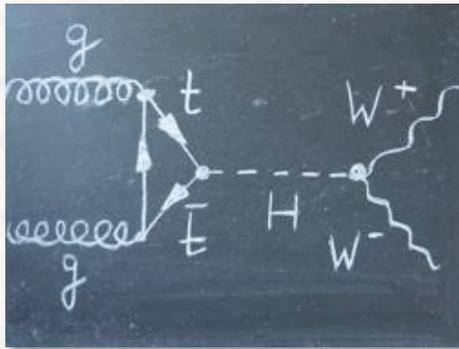
→ wenn ungleiche Lepton Familie ( $\mu^+e^-$ ,  $\mu^-e^+$ )

◦  **$E_{T,miss} > 20 \text{ GeV}$**

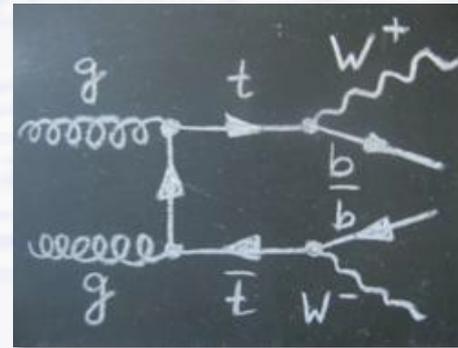
# Besondere Schwierigkeit: Untergrund

- Andere Prozesse mit Zerfällen in 2 W-Bosonen sind sehr viel häufiger als bei Higgs-Zerfällen

Gesucht:

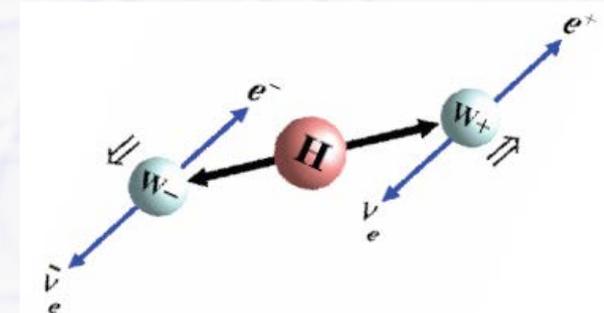


aber 10x häufiger:  
Untergrund (ohne Higgs...)



## Lösung: Winkelverteilung!

- W-Bosonen aus Higgs-Zerfällen sind **winkelkorreliert** (auch die geladenen Leptonen der W-Zerfälle)
  - Higgs Spin = 0  $\rightarrow$  W-Boson Spin = 1, Spinsumme = 0
- Messung des **transversalen Öffnungswinkels  $\Delta\phi$**  zwischen den geladenen Leptonen
  - Higgs-Ereignisse nur zwischen  $0^\circ$  und  $90^\circ$ , Untergrund überwiegend  $> 90^\circ$



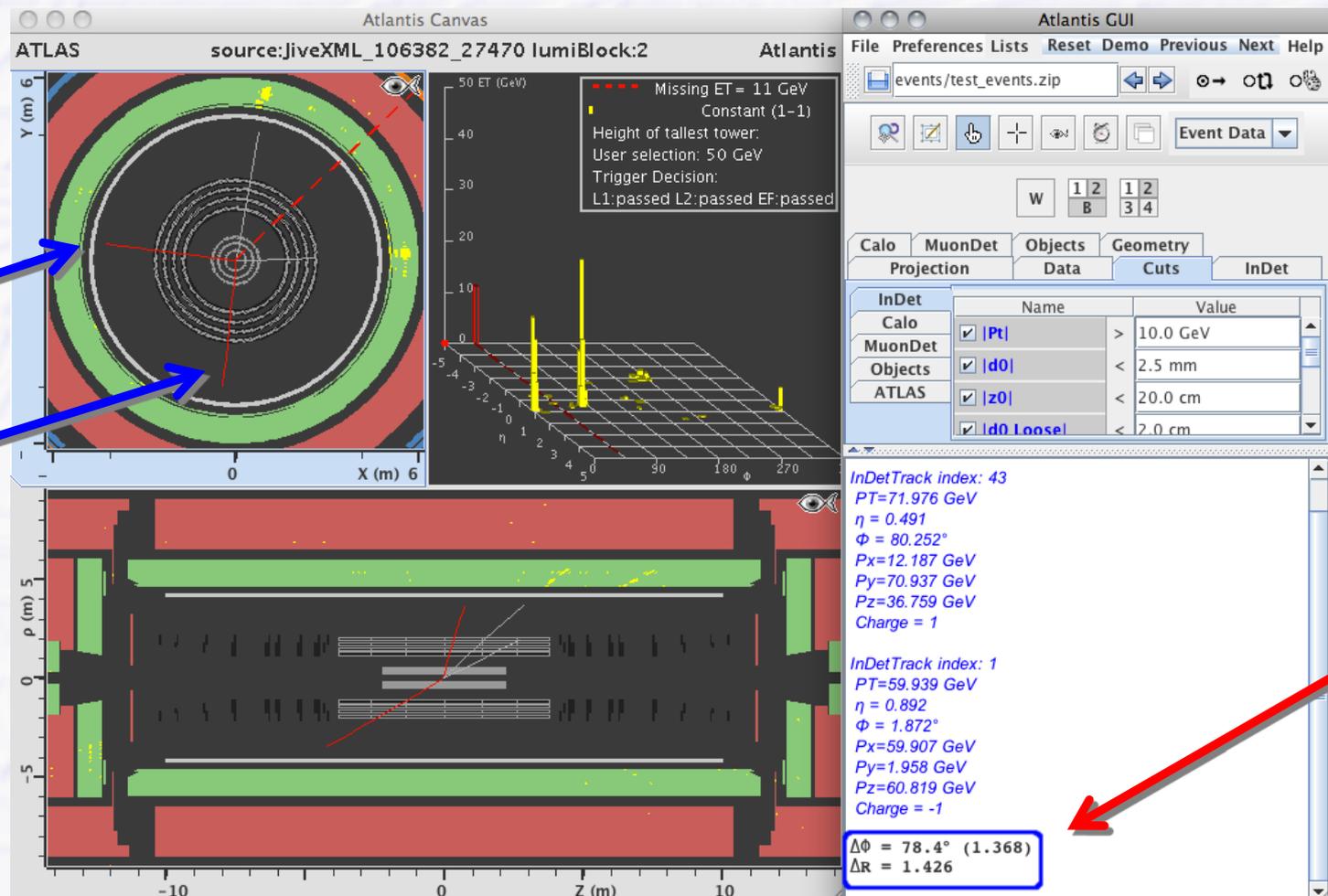
# Winkelmessung zwischen 2 Spuren

- Taste "P" gedrückt halten und beide Spuren nacheinander anklicken

→ Anzeige des **transversalen Öffnungswinkels  $\Delta\phi$**  in der Infobox

Spur 1

Spur 2



# Statistik

## ● Entdeckung – wann ist man sicher?

→ wichtig: **statistische Signifikanz in  $\sigma$**

- S = Anzahl Signalereignisse
- B = Anzahl Untergrundereignisse (background)
- $\sqrt{B}$  = statistische Fluktuation des Untergrunds

→ **Wahrscheinlichkeiten, dass der Untergrund durch zufällige (statistische) Fluktuation ein scheinbares (falsches) Signal vortäuscht**

- $1\sigma$  Signifikanz → 32%
- $2\sigma$  Signifikanz → 4.5%
- $3\sigma$  Signifikanz → 0.27% → Hinweis auf... (evidence for...), erste Veröffentlichung...
- $4\sigma$  Signifikanz → 0.007% → starker Hinweis auf... (strong evidence for...)

## ● **$5\sigma$ Signifikanz → 0.00006% (~ 1 : 1.7 Millionen)**

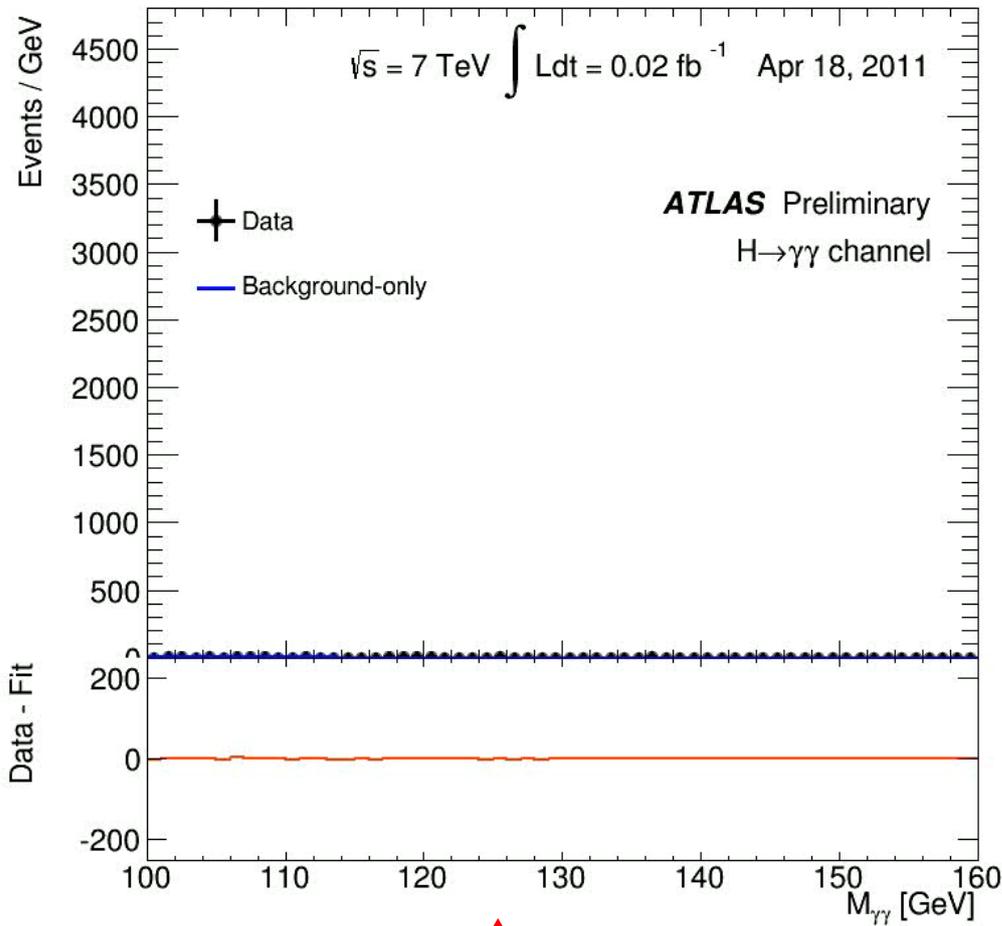
→ **Entdeckung von...** (discovery of...)

**bestätigte Entdeckung → unabhängiges zweites Experiment mit  $5\sigma$  Signifikanz → Nobelpreis...**

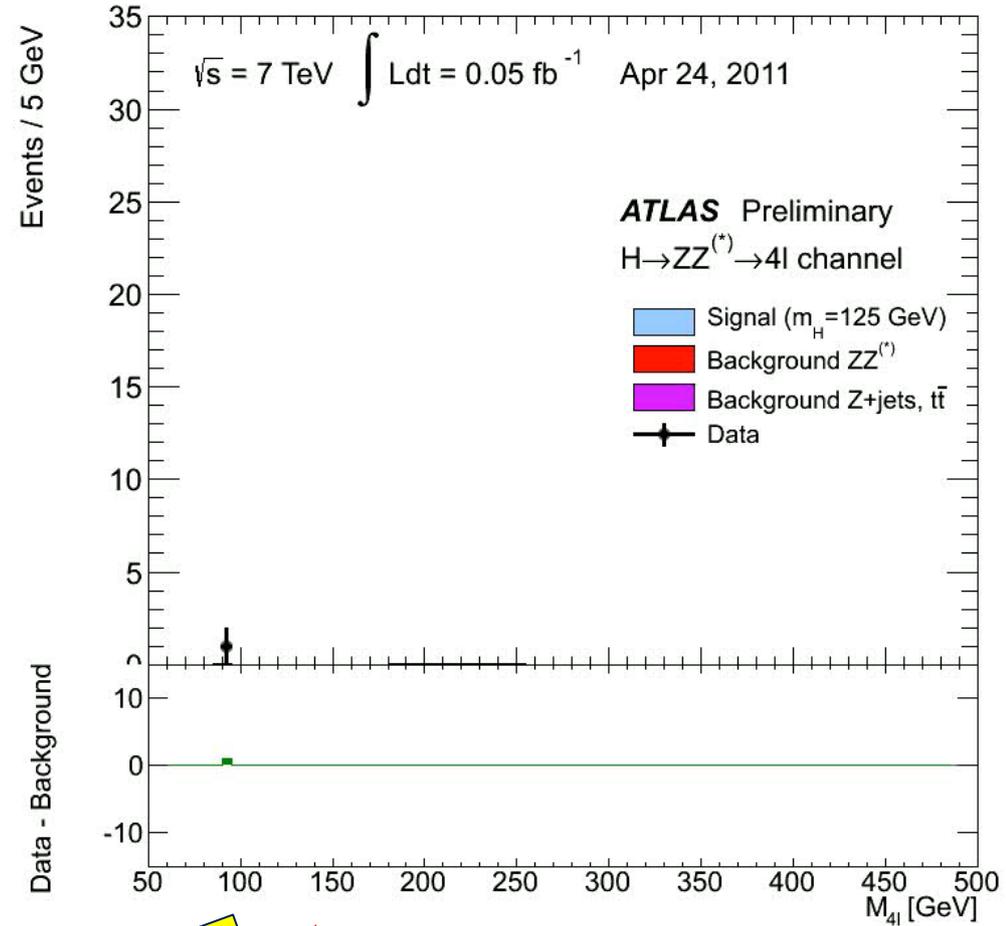
# Higgs Signalentwicklung mit der Zeit

$H \rightarrow \gamma\gamma$

$H \rightarrow 4l$



Higgs hier...



Higgs hier...

Gesamte Daten 2011 + 2012

# Zusammenfassung Aufgaben

## ● Messung 1:

- Bestimme das Verhältnis von u und d Quarks im Proton aus dem Verhältnis von  $W^+/W^-$  Zerfällen
- dazu Identifizierung von W-Zerfällen
  - genau **ein hochenergetisches**, elektrisch geladenes Lepton, myon (bzw. Antimyon) oder Elektron (bzw. Positron) mit  $p_T > 20 \text{ GeV}/c$ , **Ladung des Leptons** bestimmen
  - elektrisch geladenes Lepton **isoliert** von Jets
  - **fehlende Energie**  $E_{T,miss} > 20 \text{ GeV}$

## ● Messung 2:

- Higgs suchen im Zerfallskanal  $H \rightarrow W^+W^-$
- dazu Identifizierung von **zwei** W-Zerfällen
  - genau **zwei hochenergetische**, **elektrisch unterschiedlich** geladene Leptonen,  $\mu^+\mu^-$ ,  $e^+e^-$ ,  $\mu^+e^-$ ,  $\mu^-e^+$  mit  $p_{T,1} > 20 \text{ GeV}/c$ ,  $p_{T,2} > 10 \text{ GeV}/c$ , **Ladungen der Leptonen** bestimmen
  - kein Jet oder maximal ein Jet, wenn 1 Jet: elektrisch geladene Leptonen **isoliert** von Jet
  - fehlende Energie  $E_{T,miss} > 40 \text{ GeV}$  ( $\mu^+\mu^-$ ,  $e^+e^-$ ),  $E_{T,miss} > 20 \text{ GeV}$  ( $\mu^+e^-$ ,  $\mu^-e^+$ )
  - **transversaler Öffnungswinkel**  $\Delta\phi$  zwischen den geladenen Leptonen bestimmen

# Übung 2

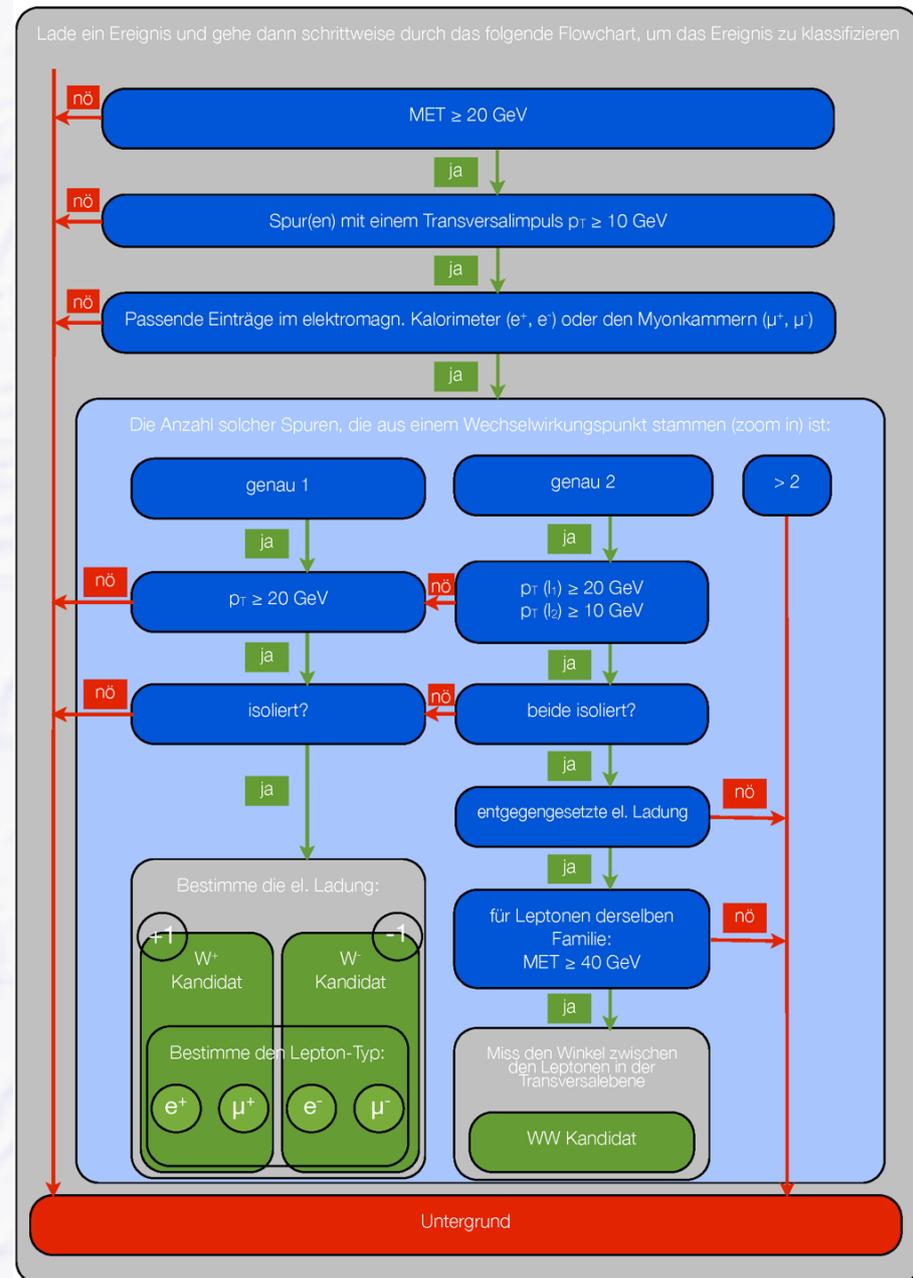
## Übung 2 - Ereignisidentifikation

- 10 Ereignisse zum Klassifizieren
- Einlesen und Ansicht in **Minerva**
- Anwendung 'atlantis' vom Desktop starten

| Inhalt                        |
|-------------------------------|
| Ziele/Aufgaben                |
| Teilchenidentifikation        |
| <b>Ereignisidentifikation</b> |
| Forschung am LHC              |
| Das W-Boson                   |
| Ereignisse identifizieren     |
| Das Higgs-Teilchen            |
| <b>Übung 2</b>                |
| Messung                       |
| Auswertung                    |

## Flussdiagramm zur $W(W)$ -Suche

(zu Übung 2 + Datenanalyse)



# Datenanalyse

Ereignispakete mit je 50 events (**1A.zip ... 1T.zip**) befinden sich im Ordner 'events' von Minerva

| Data sample:  |         | Signal 1       |                |                |                | Signal 2  |                  | Back-ground | Comment |
|---|---------|----------------|----------------|----------------|----------------|-----------|------------------|-------------|---------|
| 1   | A       | W → ν + ...    |                | W → ν + ...    |                | WW → lνlν | ΔΦ <sub>ll</sub> |             |         |
|   |         | e <sup>+</sup> | e <sup>-</sup> | μ <sup>+</sup> | μ <sup>-</sup> |           |                  |             |         |
|  | Event # |                |                |                |                |           |                  |             |         |
|   | 1       |                |                |                |                |           |                  |             |         |
|   | 2       |                |                |                |                |           |                  |             |         |
|   | 3       |                |                |                |                |           |                  |             |         |
|   | 4       |                |                |                |                |           |                  |             |         |

In Minerva zu ladendes Datenpaket

Eintrag hier je nach gefundenem Lepton

Bei WW-Kandidaten hier Event-Nr. und Winkel eintragen

Eintrag hier, falls kein Lepton gefunden (background)

|                   |    |  |  |  |  |  |  |  |
|-------------------|----|--|--|--|--|--|--|--|
|                   | 47 |  |  |  |  |  |  |  |
|                   | 48 |  |  |  |  |  |  |  |
|                   | 49 |  |  |  |  |  |  |  |
|                   | 50 |  |  |  |  |  |  |  |
| Number of Events: |    |  |  |  |  |  |  |  |

Letzte Zeile: hier Aufsummieren

# Endergebnisse

Eintragen auf: <http://kjende.web.cern.ch/kjende/results/WpathAnalysis.php?institutID=236>

Combination spreadsheet International Masterclasses 2013 - Mozilla Firefox

Venue: GTP-CERN 2014 Date: 17.04.2014  saved



| Total #                              | W → ... + ν                      |                      |                      |                      | Background                         | WW                   | WW event numbers and lepton angle |                      |                      |                      |
|--------------------------------------|----------------------------------|----------------------|----------------------|----------------------|------------------------------------|----------------------|-----------------------------------|----------------------|----------------------|----------------------|
|                                      | e <sup>+</sup>                   | e <sup>-</sup>       | μ <sup>+</sup>       | μ <sup>-</sup>       |                                    |                      | no. 1                             |                      | no. 2                |                      |
|                                      |                                  |                      |                      |                      |                                    |                      | event no                          | angle                | event no             | angle                |
| 0                                    |                                  |                      |                      |                      |                                    |                      |                                   |                      |                      |                      |
| group A                              | <input type="text"/>             | <input type="text"/> | <input type="text"/> | <input type="text"/> | <input type="text"/>               | <input type="text"/> | <input type="text"/>              | <input type="text"/> | <input type="text"/> | <input type="text"/> |
| group B                              | <input type="text"/>             | <input type="text"/> | <input type="text"/> | <input type="text"/> | <input type="text"/>               | <input type="text"/> | <input type="text"/>              | <input type="text"/> | <input type="text"/> | <input type="text"/> |
| group C                              | <input type="text"/>             | <input type="text"/> | <input type="text"/> | <input type="text"/> | <input type="text"/>               | <input type="text"/> | <input type="text"/>              | <input type="text"/> | <input type="text"/> | <input type="text"/> |
| group D                              | <input type="text"/>             | <input type="text"/> | <input type="text"/> | <input type="text"/> | <input type="text"/>               | <input type="text"/> | <input type="text"/>              | <input type="text"/> | <input type="text"/> | <input type="text"/> |
| group E                              | <input type="text"/>             | <input type="text"/> | <input type="text"/> | <input type="text"/> | <input type="text"/>               | <input type="text"/> | <input type="text"/>              | <input type="text"/> | <input type="text"/> | <input type="text"/> |
| group F                              | <input type="text"/>             | <input type="text"/> | <input type="text"/> | <input type="text"/> | <input type="text"/>               | <input type="text"/> | <input type="text"/>              | <input type="text"/> | <input type="text"/> | <input type="text"/> |
| group G                              | <input type="text"/>             | <input type="text"/> | <input type="text"/> | <input type="text"/> | <input type="text"/>               | <input type="text"/> | <input type="text"/>              | <input type="text"/> | <input type="text"/> | <input type="text"/> |
| group H                              | <input type="text"/>             | <input type="text"/> | <input type="text"/> | <input type="text"/> | <input type="text"/>               | <input type="text"/> | <input type="text"/>              | <input type="text"/> | <input type="text"/> | <input type="text"/> |
| group I                              | <input type="text"/>             | <input type="text"/> | <input type="text"/> | <input type="text"/> | <input type="text"/>               | <input type="text"/> | <input type="text"/>              | <input type="text"/> | <input type="text"/> | <input type="text"/> |
| group J                              | <input type="text"/>             | <input type="text"/> | <input type="text"/> | <input type="text"/> | <input type="text"/>               | <input type="text"/> | <input type="text"/>              | <input type="text"/> | <input type="text"/> | <input type="text"/> |
| group K                              | <input type="text"/>             | <input type="text"/> | <input type="text"/> | <input type="text"/> | <input type="text"/>               | <input type="text"/> | <input type="text"/>              | <input type="text"/> | <input type="text"/> | <input type="text"/> |
| group L                              | <input type="text"/>             | <input type="text"/> | <input type="text"/> | <input type="text"/> | <input type="text"/>               | <input type="text"/> | <input type="text"/>              | <input type="text"/> | <input type="text"/> | <input type="text"/> |
| group M                              | <input type="text"/>             | <input type="text"/> | <input type="text"/> | <input type="text"/> | <input type="text"/>               | <input type="text"/> | <input type="text"/>              | <input type="text"/> | <input type="text"/> | <input type="text"/> |
| group N                              | <input type="text"/>             | <input type="text"/> | <input type="text"/> | <input type="text"/> | <input type="text"/>               | <input type="text"/> | <input type="text"/>              | <input type="text"/> | <input type="text"/> | <input type="text"/> |
| group O                              | <input type="text"/>             | <input type="text"/> | <input type="text"/> | <input type="text"/> | <input type="text"/>               | <input type="text"/> | <input type="text"/>              | <input type="text"/> | <input type="text"/> | <input type="text"/> |
| group P                              | <input type="text"/>             | <input type="text"/> | <input type="text"/> | <input type="text"/> | <input type="text"/>               | <input type="text"/> | <input type="text"/>              | <input type="text"/> | <input type="text"/> | <input type="text"/> |
| group Q                              | <input type="text"/>             | <input type="text"/> | <input type="text"/> | <input type="text"/> | <input type="text"/>               | <input type="text"/> | <input type="text"/>              | <input type="text"/> | <input type="text"/> | <input type="text"/> |
| group R                              | <input type="text"/>             | <input type="text"/> | <input type="text"/> | <input type="text"/> | <input type="text"/>               | <input type="text"/> | <input type="text"/>              | <input type="text"/> | <input type="text"/> | <input type="text"/> |
| group S                              | <input type="text"/>             | <input type="text"/> | <input type="text"/> | <input type="text"/> | <input type="text"/>               | <input type="text"/> | <input type="text"/>              | <input type="text"/> | <input type="text"/> | <input type="text"/> |
| group T                              | <input type="text"/>             | <input type="text"/> | <input type="text"/> | <input type="text"/> | <input type="text"/>               | <input type="text"/> | <input type="text"/>              | <input type="text"/> | <input type="text"/> | <input type="text"/> |
| Total                                | 0                                | 0                    | 0                    | 0                    | 0                                  | 0                    |                                   |                      |                      |                      |
| Σ W <sup>+</sup>  , Σ W <sup>-</sup> | W <sup>+</sup>                   | 0                    | W <sup>-</sup>       | 0                    | W <sup>+</sup>   +  W <sup>-</sup> | 0                    |                                   |                      |                      |                      |
| Ratio                                | W <sup>+</sup>  / W <sup>-</sup> |                      | NaN                  |                      | ±                                  | NaN                  |                                   |                      |                      |                      |

# Literatur + Webseiten

- [1] The ATLAS Collaboration: Measurement of the muon inclusive cross section in pp collisions at  $\sqrt{s} = 7$  TeV with the ATLAS detector, 21.11.2011, [Link](#).
- [2] The ATLAS Collaboration: Measurement of the  $W \rightarrow \text{Inu}$  and  $Z/\text{gamma}^* \rightarrow \text{ll}$  production cross sections in proton-proton collisions at  $\sqrt{s} = 7$  TeV with the ATLAS detector, 9.10.2010
- [3] The ATLAS Collaboration: ATLAS high-level trigger, data-acquisition and controls : Technical Design Report. Geneva, CERN, 2003.
- [4] Joe Incandela on behalf of the CMS Collaboration: Status of the CMS SM Higgs Search. CERN-Seminar, July 4 2012. Link: [https://cms-docdb.cern.ch/cgi-bin/PublicDocDB/RetrieveFile?docid=6125&filename=CMS\\_4July2012\\_Incandela.pdf](https://cms-docdb.cern.ch/cgi-bin/PublicDocDB/RetrieveFile?docid=6125&filename=CMS_4July2012_Incandela.pdf)

<http://www.cern.ch/kjende/de/wpath.htm> - Webseite zur ATLAS W-Messung bei Masterclasses

[http://www.cern.ch/kjende/de/wpath\\_teilchenid1.htm](http://www.cern.ch/kjende/de/wpath_teilchenid1.htm) - Webseite mit interaktivem Applet zur Teilchenidentifikation in ATLAS

<http://www.cern.ch/kjende/de/downloads/minerva2012.zip> - Link zum Herunterladen des Event Display Programms MINERVA

<http://www.atlas.ch> - offizielle Webseite des ATLAS-Experimentes mit sehr guter Multimedia-Abteilung

<http://www.physicsmasterclasses.org> - Informationen zu den Internationalen Masterclasses

<http://www.teilchenwelt.de> - Webseite des deutschen Netzwerk Teilchenwelt mit Informationen zur Beteiligung im Netzwerk, Veranstaltungen (Teilchenwelt-Masterclasses und Cosmic Workshops) auch an Ihrer Schule uvm.