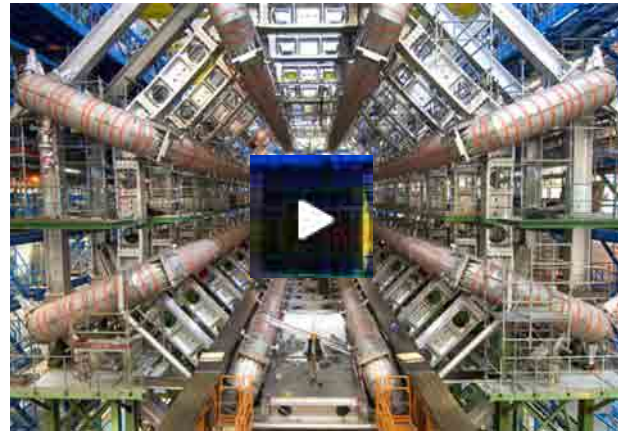


Teil 2: Analyse von Teilchenspuren im ATLAS-Detektor

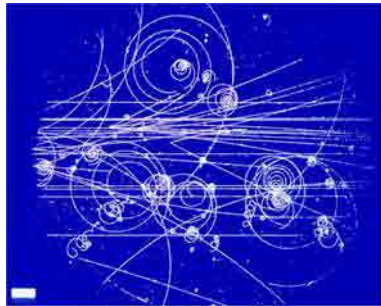




Wie weist man Elementarteilchen nach?

Bildgebende Detektoren

z.B.: Nebelkammer, Blasenkammer



Ø sichtbare Teilchenspuren

Elektronische Detektoren

z.B: **ATLAS**-Detektor, Geigerzähler

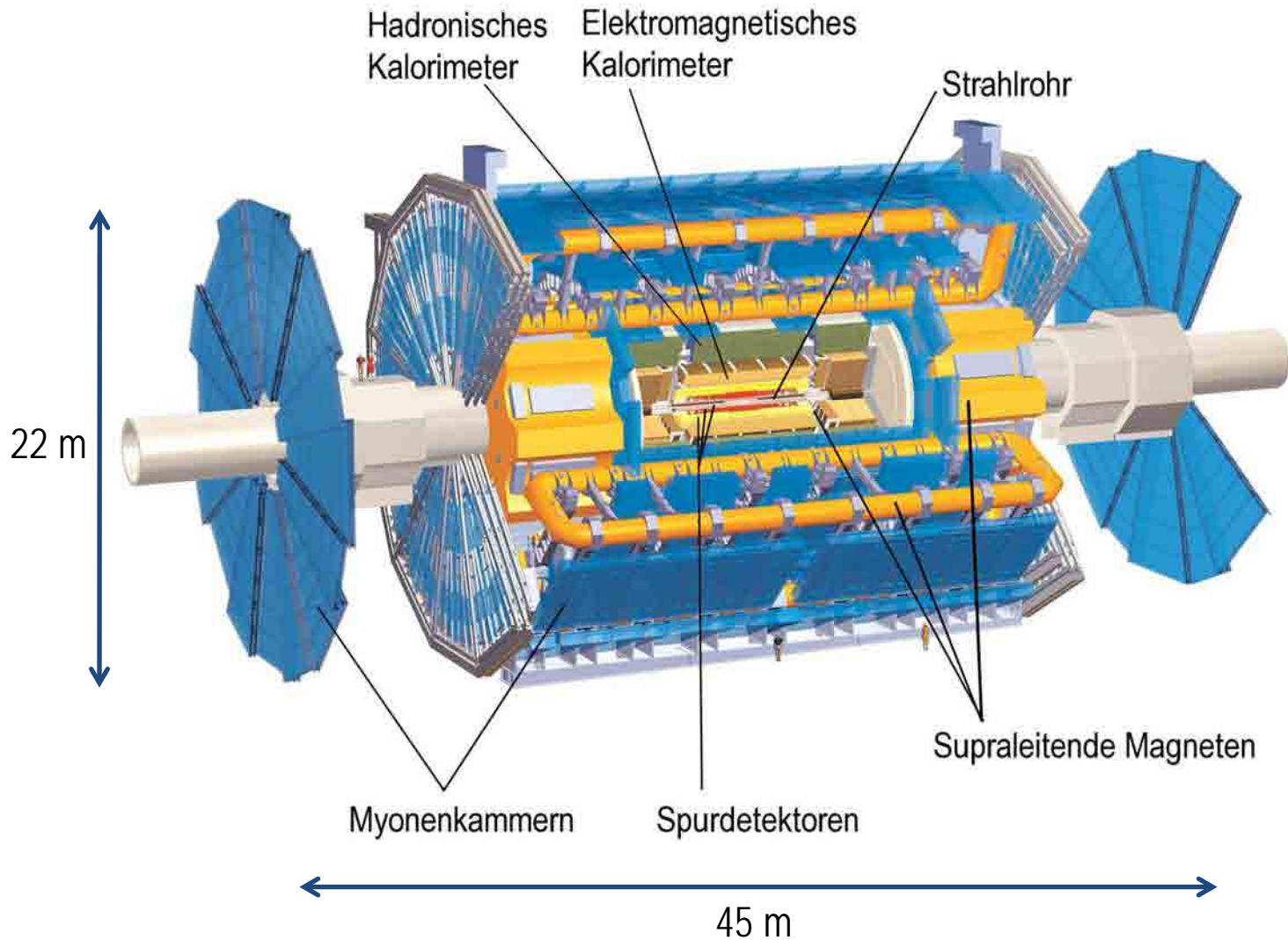


Ø elektrische Signale

Ø Eigenschaften der Teilchen werden daraus rekonstruiert



Der ATLAS-Detektor





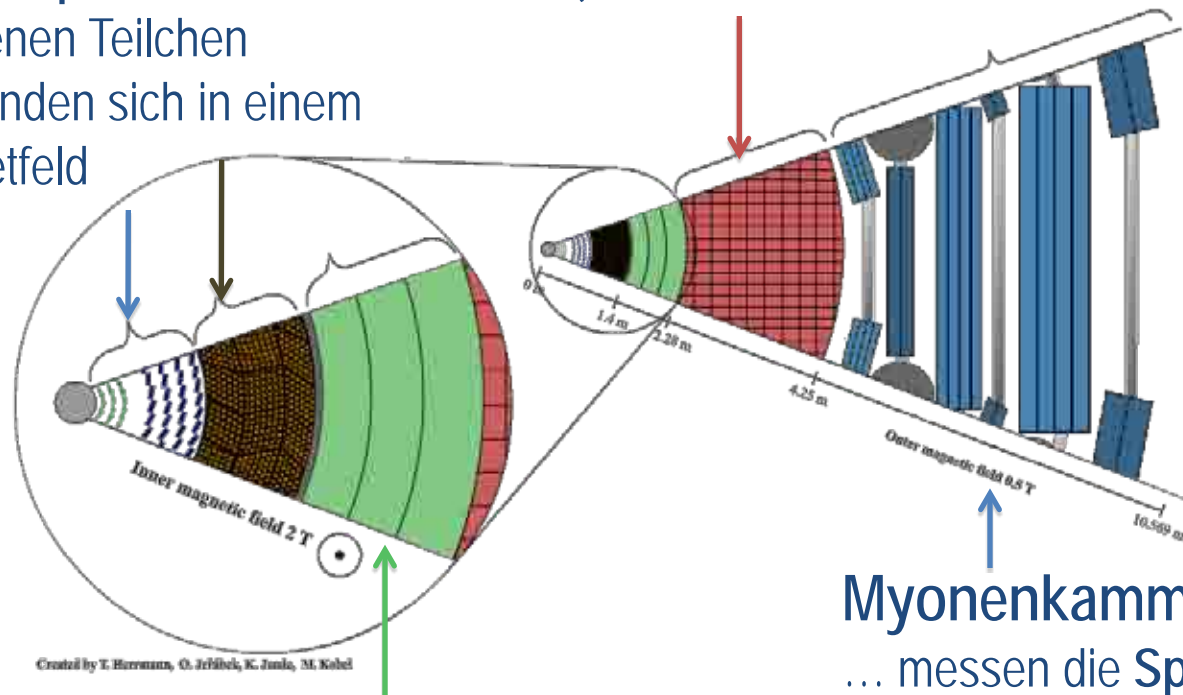
Der ATLAS-Detektor

Spurdetektoren

... messen die **Spuren**
und **Impulse** von
geladenen Teilchen
... befinden sich in einem
Magnetfeld

Hadronisches Kalorimeter

... misst die **Energie** von Hadronen
(= aus Quarks bestehende Teilchen)



Elektromagnetisches Kalorimeter

... misst die **Energie** von Elektronen,
Positronen und Photonen

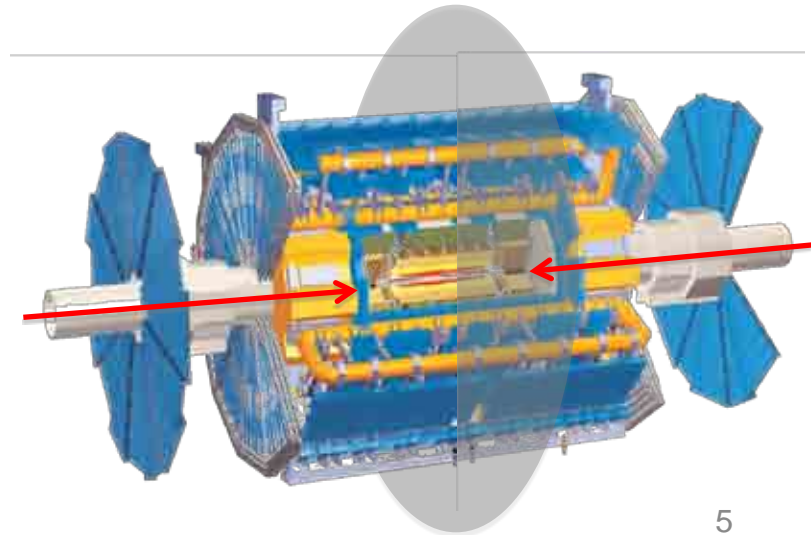
Myonenkammern

... messen die **Spuren**
und **Impulse** von Myonen
... befinden sich in einem
Magnetfeld



Was misst ATLAS?

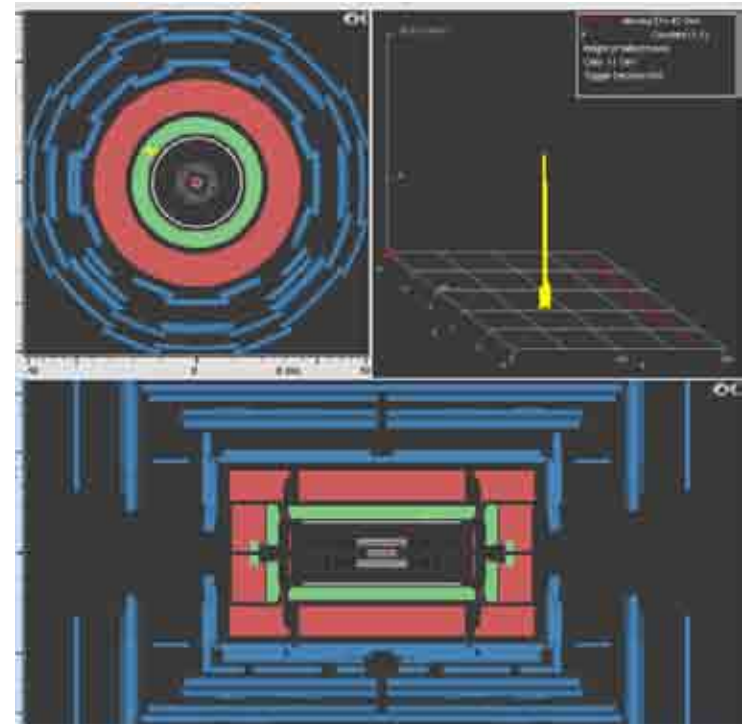
- Spurdetektoren: **Spur**
Impuls und Vorzeichen der elektrischen Ladung
- Kalorimeter: **Energie**
- Besonders wichtig sind die **transversalen Anteile** von Impuls und Energie (**senkrecht zum Strahlrohr**):
 - PT: transversaler Impuls
 - ET: transversale Energie





Teilchenrekonstruktion

- Impulsmessung
 - Energiemessung
 - Ladungsbestimmung
- ∅ Grafische Darstellung der Teilchenspuren und Energieeinträge in einem „Event-Display“

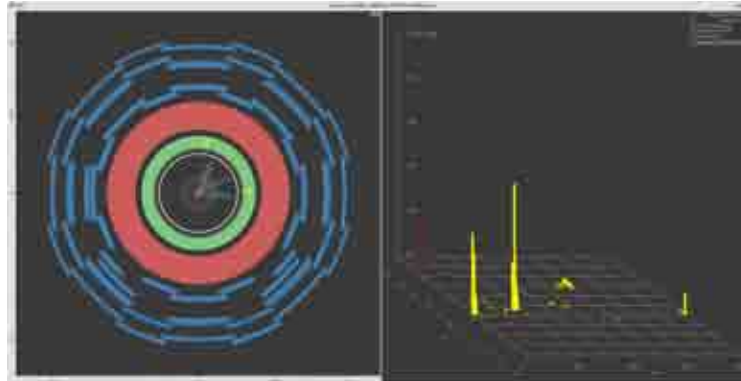




Das Event-Display

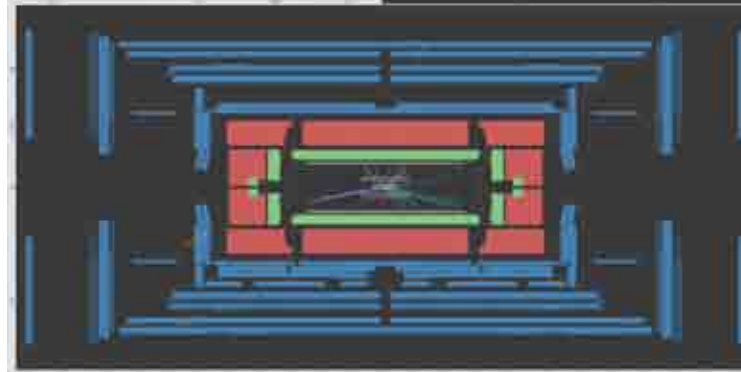
So stellt die Software MINERVA den ATLAS-Detektor dar:

Querschnitt des
ATLAS-Detektors



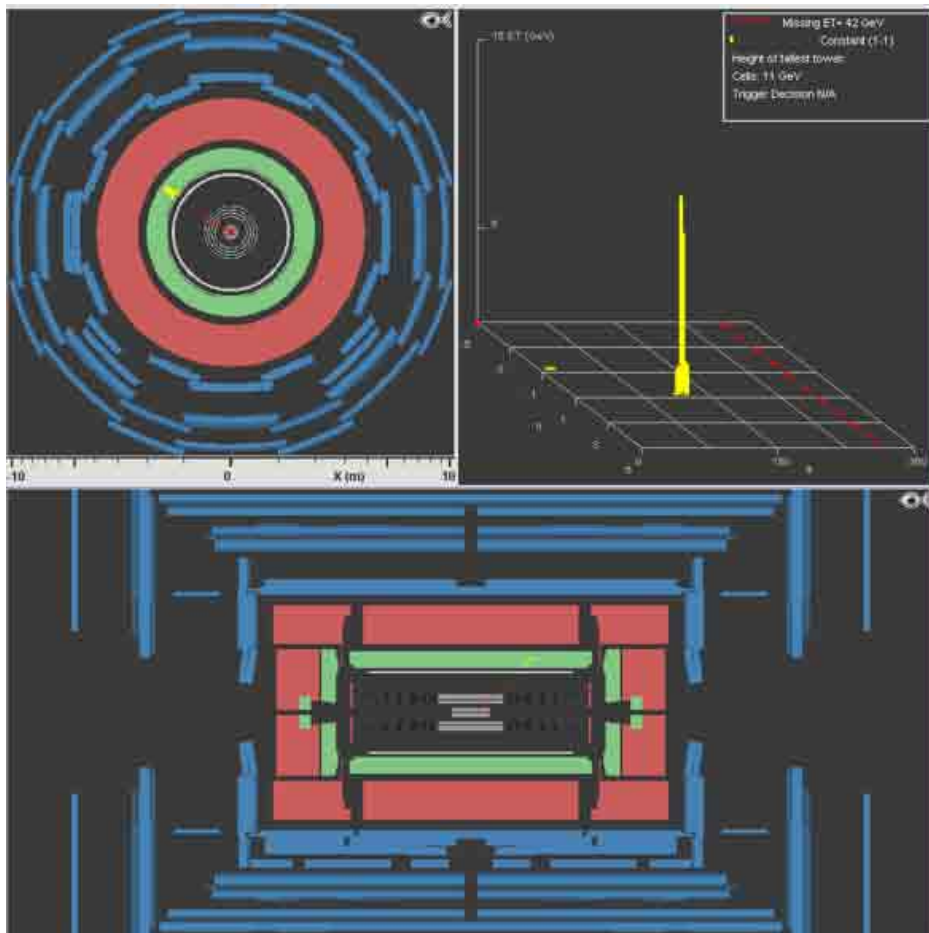
Energieeinträge im
Kalorimeter

Seitenansicht





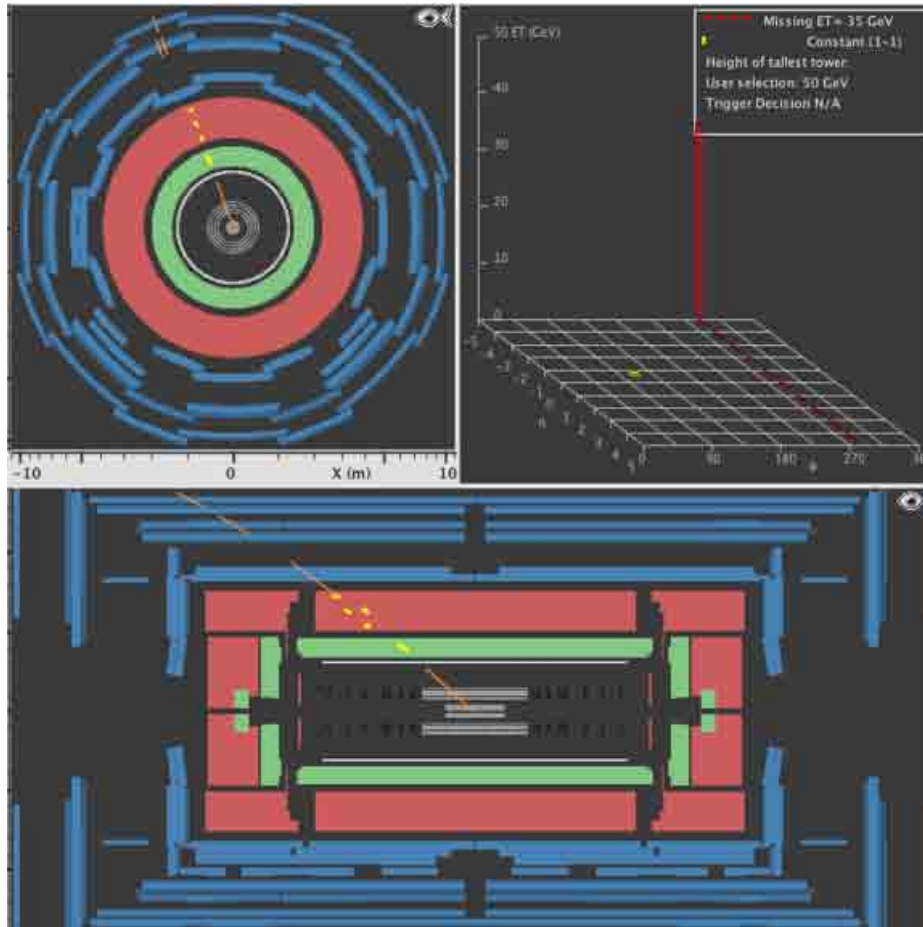
Teilchenspuren: Elektron oder Positron



- Spur im inneren Detektor
- Vollständige Energieabgabe im elektromagnetischen Kalorimeter
- Keine Energieabgabe im hadronischen Kalorimeter
- Photon:
Wie Elektron, aber ohne Spur im inneren Detektor



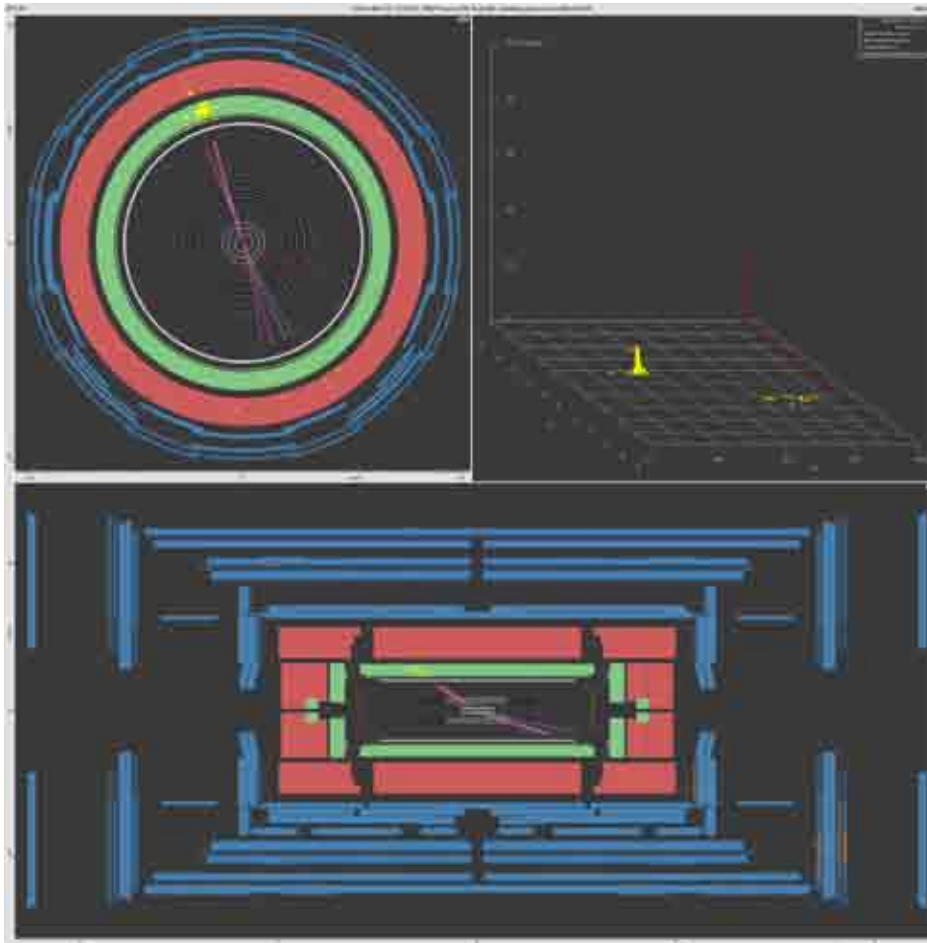
Teilchenspuren: Myon oder Antimyon



- Spur im inneren Detektor und in den Myonenkammern
- Wenig Energieabgabe in Kalorimetern
- Spuren in den Myonenkammern sind teils schwierig erkennbar
 - Ø Beide Ansichten nutzen!



Teilchenspuren: Quarks

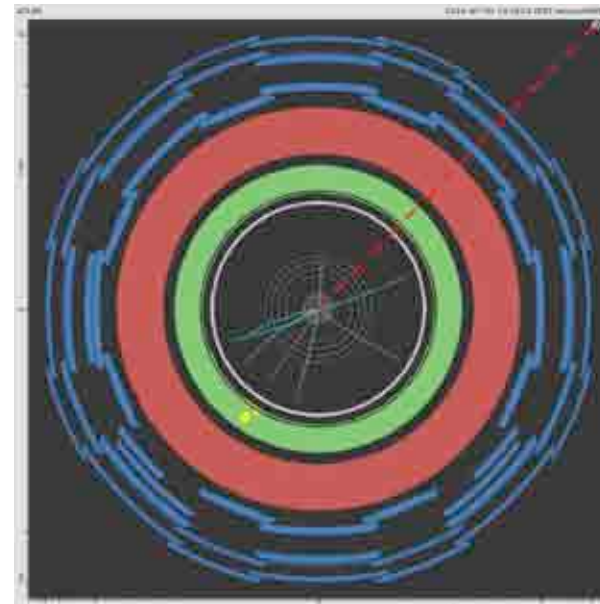
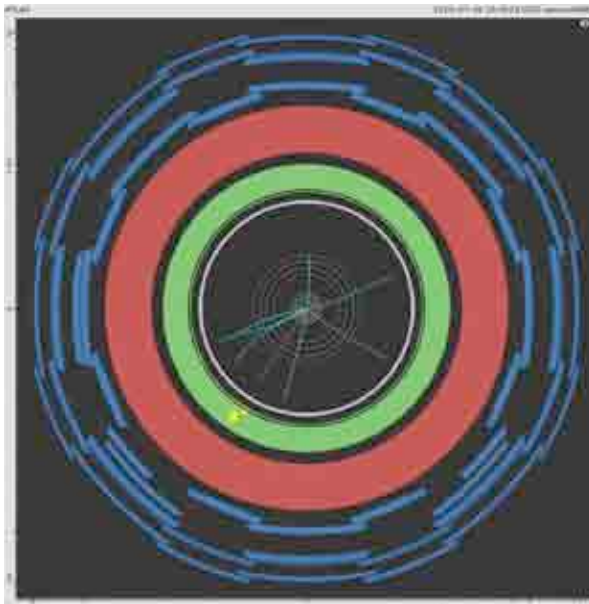


- Quarks erzeugen Bündel aus Hadronen (z.B. Pionen, Protonen, Neutronen): **Jets**
- Nachweis:
 - Ø Spurbündel
 - Ø Energieabgabe in beiden Kalorimetern



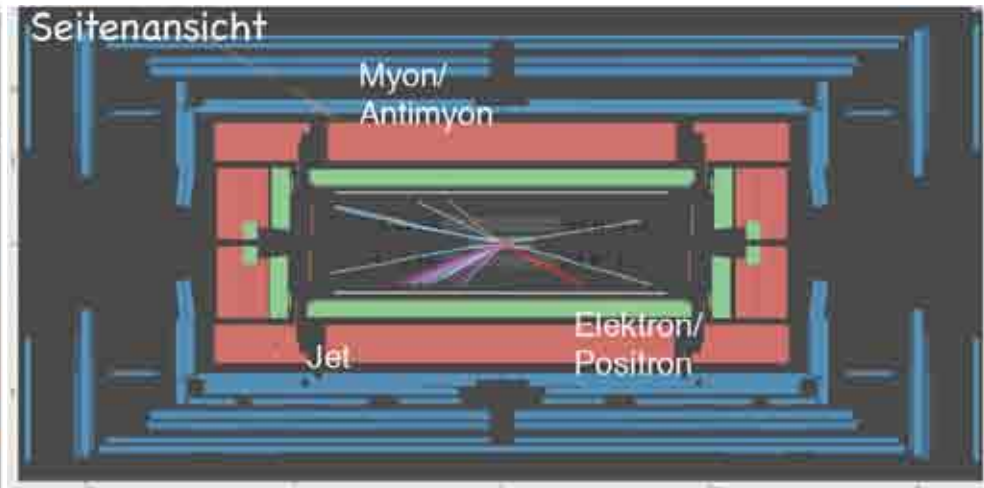
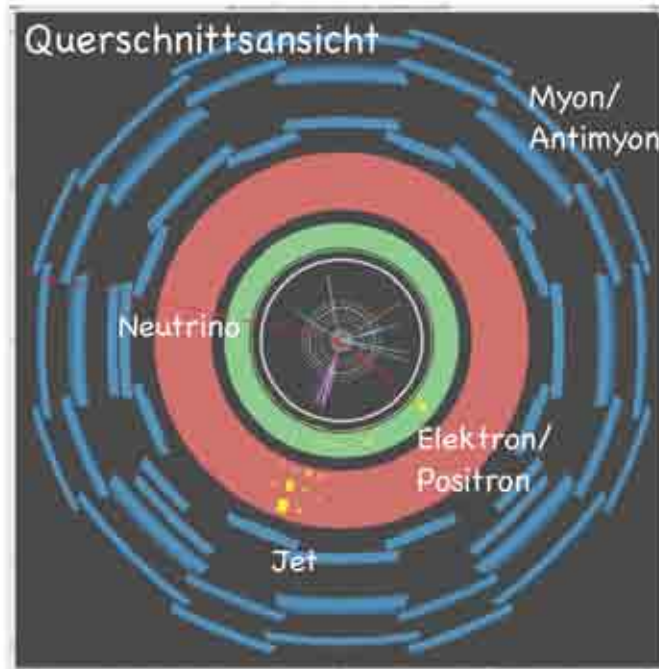
Neutrinos

- Neutrinos hinterlassen keine Spur und keine Energie in den Kalorimetern.
∅ Woran kann man sie trotzdem erkennen?
- Wenn ein Neutrino durch den Detektor fliegt,
„fehlt“ in dieser Richtung Impuls bzw. Energie: „Missing ET“
- Die Richtung des fehlenden Impulses wird durch eine gestrichelte Linie dargestellt.





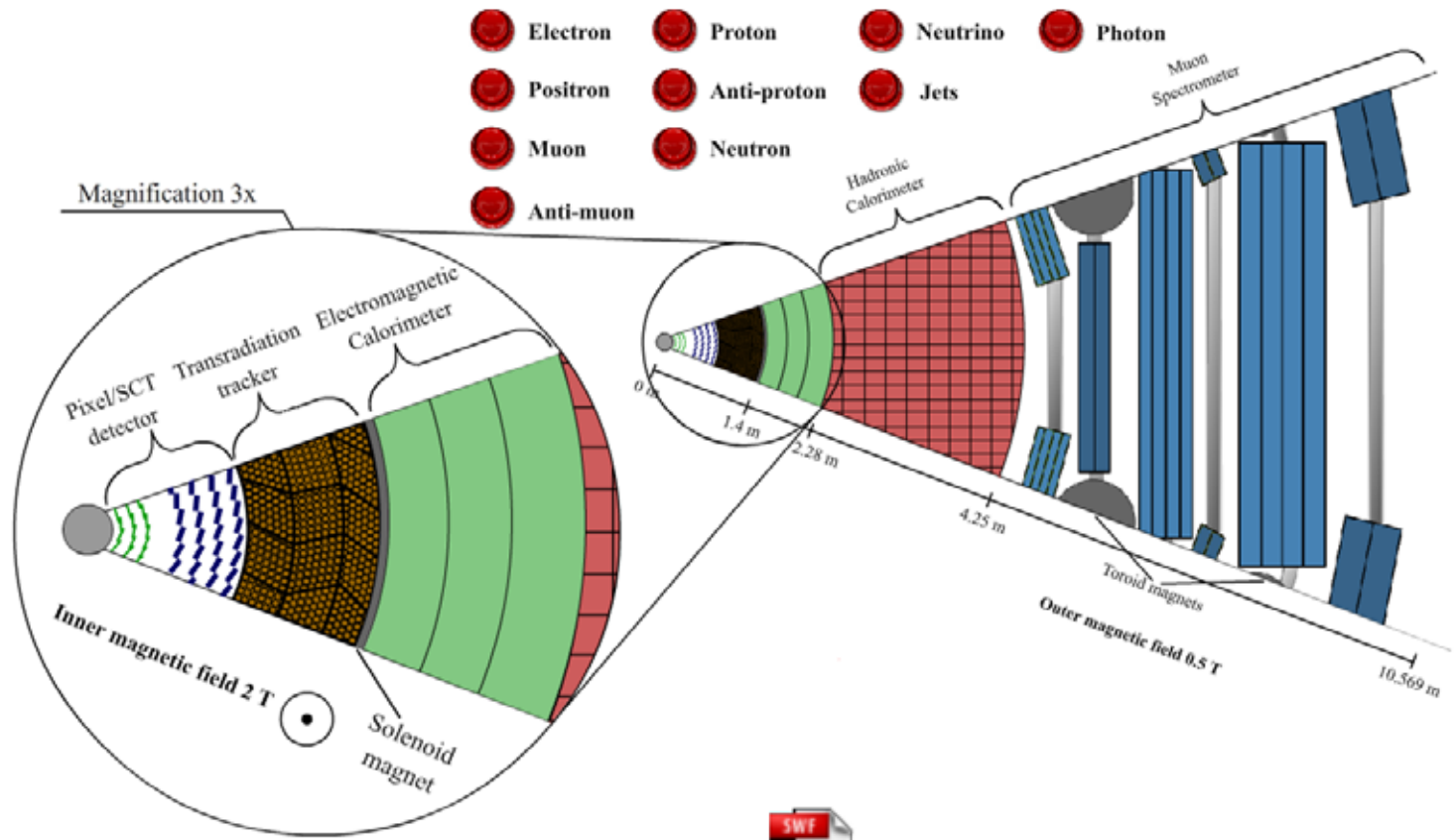
Teilchenspuren: Übersicht



- Spurdetektor
 - Elektromagnetisches Kalorimeter
 - Hadronisches Kalorimeter
 - Myonenkammer
- PT
- ≤ 2 GeV/c
 - 2 – 4 GeV/c
 - 4 – 10 GeV/c
 - 10 – 40 GeV/c
 - > 40 GeV/c



Teilchenspuren im ATLAS-Detektor



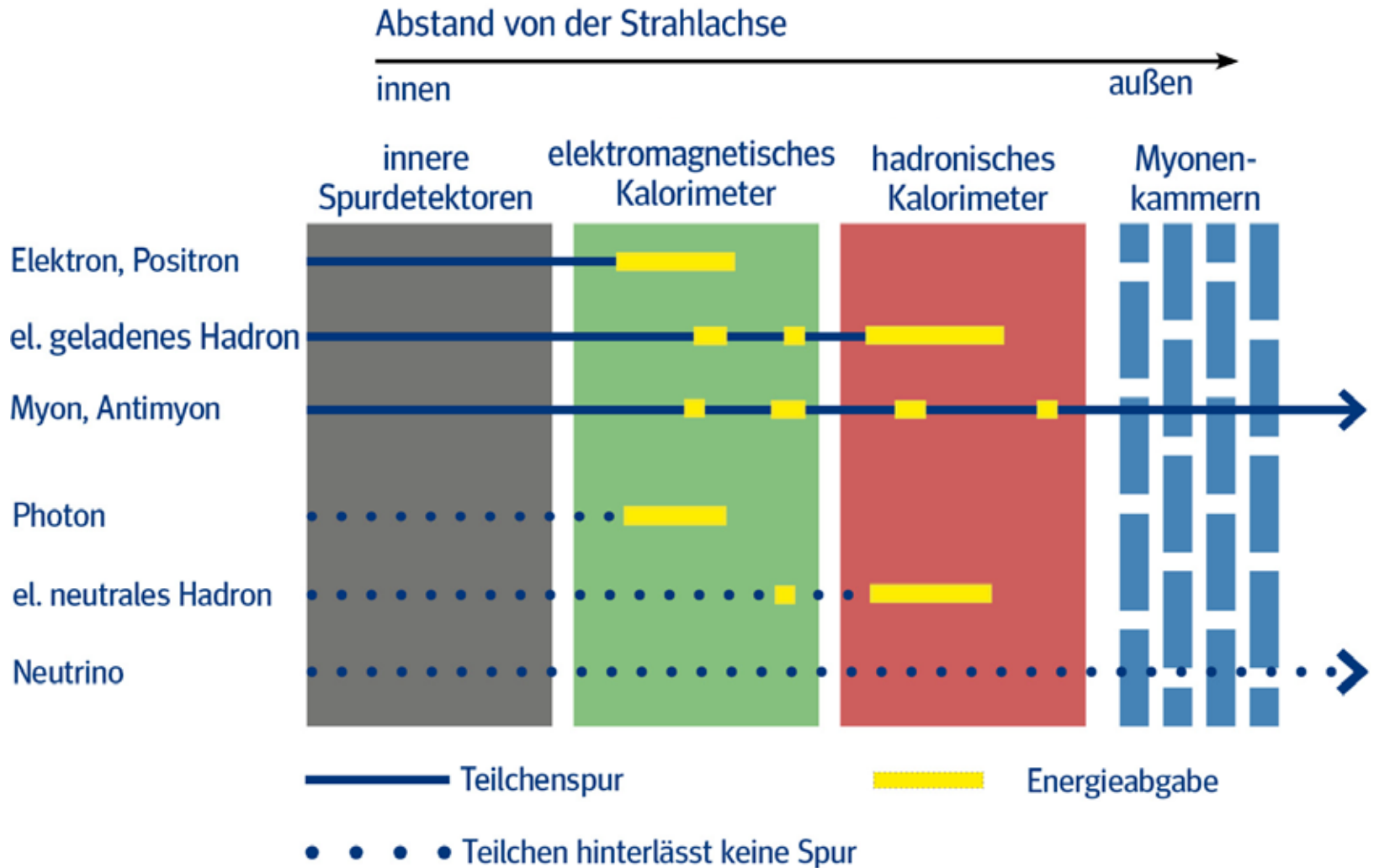
[Animation](#)



Atlas_9.swf



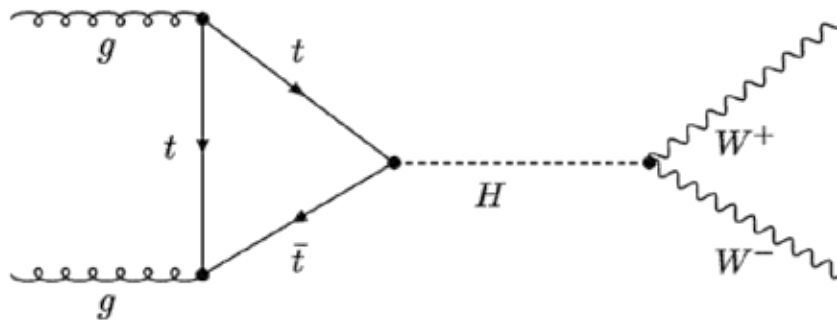
Teilchenspuren im ATLAS-Detektor





Die Hauptdarsteller heute: W-Bosonen

- Mit ihrer Hilfe werden wir den Aufbau von Protonen erforschen...
- ...und erfahren, wie Physiker nach dem Higgs-Boson suchen.



W⁻-BOSON
NACHWEIS 1983

AUSTAUSCHTEILCHEN

Mass:	80 400 MeV/c ²
Elektrische Ladung:	-1
Starke Ladung:	-
Schwache Ladung:	-1
Mittlere Lebensdauer:	- 3 · 10 ⁻²⁵ s
Reichweite:	- 10 ⁻¹⁸ m

W⁺-BOSON
NACHWEIS 1983

AUSTAUSCHTEILCHEN

Mass:	80 400 MeV/c ²
Elektrische Ladung:	+1
Starke Ladung:	-
Schwache Ladung:	+1
Mittlere Lebensdauer:	- 3 · 10 ⁻²⁵ s
Reichweite:	- 10 ⁻¹⁸ m



W-Bosonen...

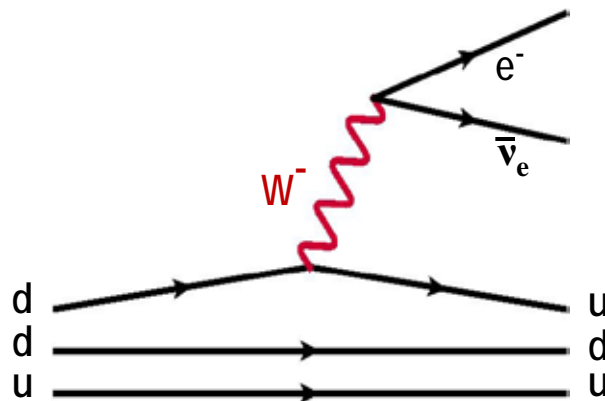
- ...sind Austauschteilchen der Schwachen Wechselwirkung
- ...sind elektrisch geladen: W^+ , W^-
- ...gehören zu den massereichsten Teilchen des Standardmodells (80,4 GeV !)
- ...wandeln sich nach ca. 10^{-25} s in leichtere Teilchen um
Ø geringe Reichweite

Daher können wir sie nicht direkt im Detektor beobachten, sondern erkennen sie anhand ihrer Zerfallsprodukte!

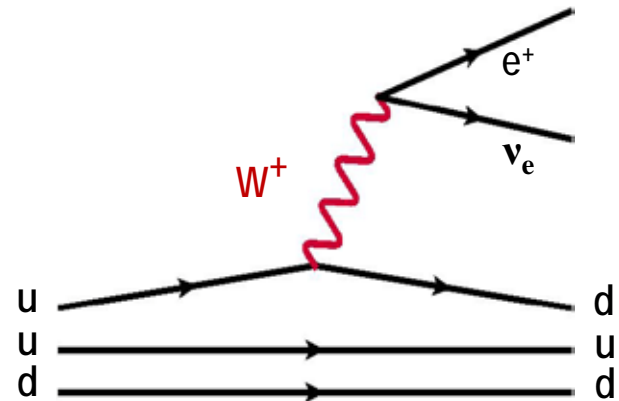


Wie entstehen W-Bosonen?

- Beim **Beta-Minus-Zerfall** wandelt sich ein Down-Quark in ein Up-Quark um und sendet ein W^- aus (umgekehrt beim Beta-Plus-Zerfall)



β^- -Zerfall: $d \rightarrow W^- + u$



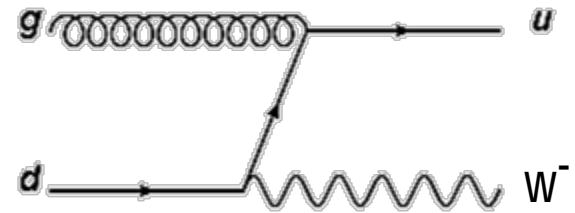
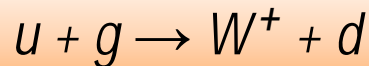
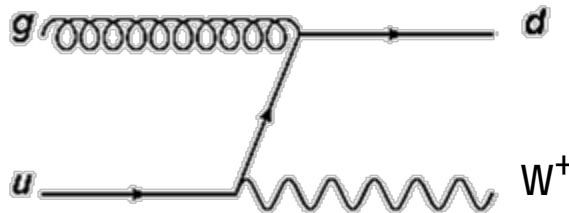
β^+ -Zerfall: $u \rightarrow W^+ + d$

- Zusammenstoß von Protonen im LHC



Wie entstehen W-Bosonen?

- Beta-Zerfall
- Zusammenstoß von Protonen im LHC:
Beim Zusammenstoß von Quarks und Gluonen wird Bewegungsenergie in Masse umgewandelt.



Ø In welchem Verhältnis sollten W^+ und W^- im LHC entstehen?

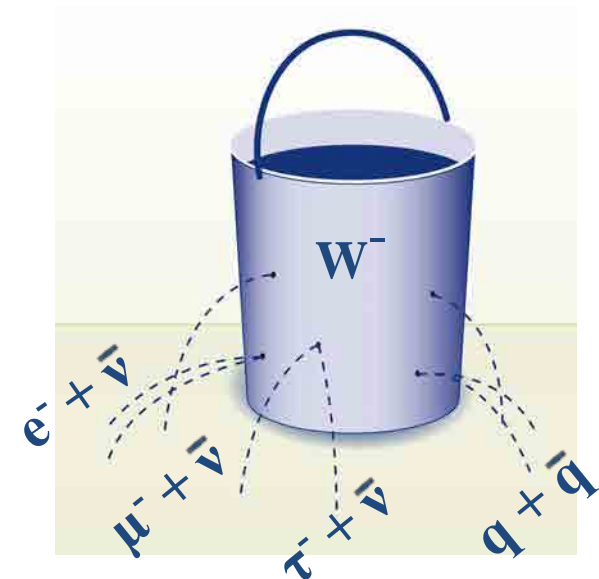


Wie erkennt man W-Bosonen?

Man sucht nach ihren Zerfallsprodukten.

W-Bosonen zerfallen meistens so:

- $W^{\pm} \rightarrow \text{Quark} + \text{Antiquark}$
- $W^{-} \rightarrow \text{Lepton} (e^{-}, \mu^{-}, \tau^{-}) + \text{Antineutrino}$
- $W^{+} \rightarrow \text{Antilepton} (e^{+}, \mu^{+}, \tau^{+}) + \text{Neutrino}$



Art der Zerfallsprodukte	(Anti-)Lepton(e, μ , τ) + (Anti-) Neutrino	Quark + Antiquark
Wahrscheinlichkeit	33,3%	66,6%
Möglichkeiten	3	6



Wie erkennt man W-Bosonen?

- Ihr sucht heute nach folgenden Zerfallsprodukten:

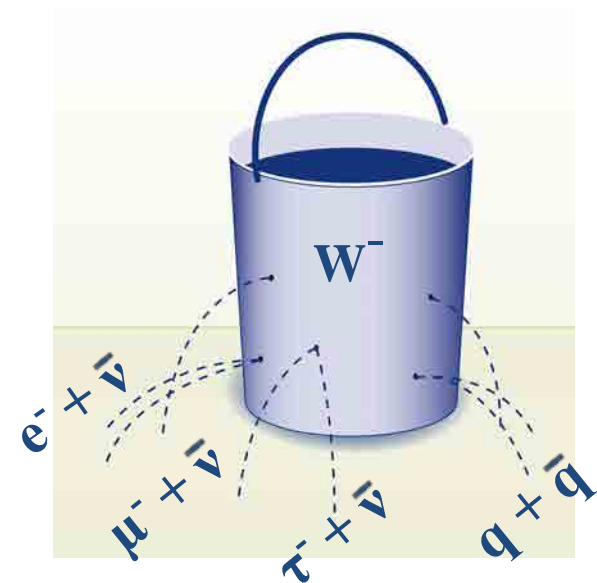
$$W^- \rightarrow e^- + \bar{\nu}$$

$$W^- \rightarrow \mu^- + \bar{\nu}$$

$$W^+ \rightarrow e^+ + \nu$$

$$W^+ \rightarrow \mu^+ + \nu$$

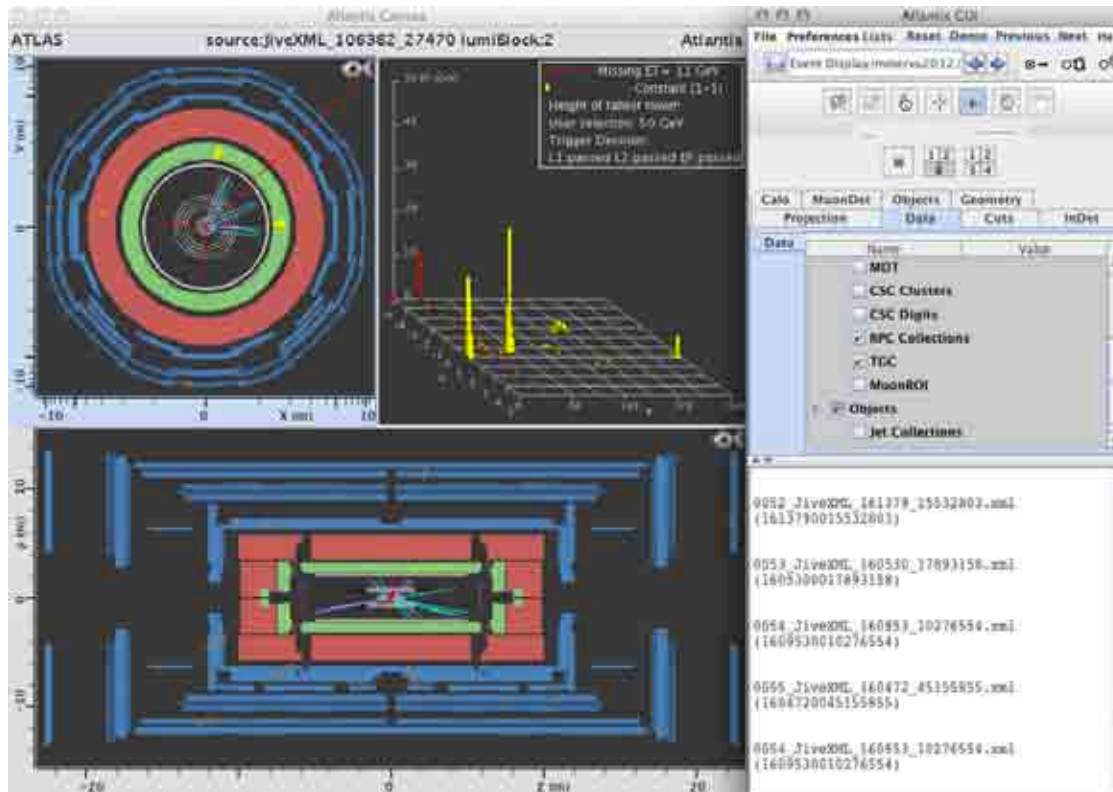
- Das sind **Signalereignisse**.
Alle anderen Ergebnisse von Kollisionen sind "Untergrund".





Die Software MINERVA

Anzeige der
Teilchen-
spuren



Werkzeuge,
Navigation

Einstellungen

Informationen zu
Teilchenspuren



Die Software MINERVA

Datenpaket
öffnen

Datenpaket
durchblättern



Zoom

Spur-
Auswahl

Fischaugen-
Zoom



Signalereignis 1: So erkennt man W-Zerfälle

$$W^- \rightarrow e^- + \bar{\nu}$$

$$W^- \rightarrow \mu^- + \bar{\nu}$$

$$W^+ \rightarrow e^+ + \nu$$

$$W^+ \rightarrow \mu^+ + \nu$$

Checkliste:

- Das Ereignis enthält ein energiereiches (Anti-)Neutrino:

Missing ET > 25 GeV (2013) >20 GeV (2014)

- Es enthält genau ein **elektrisch geladenes Lepton**

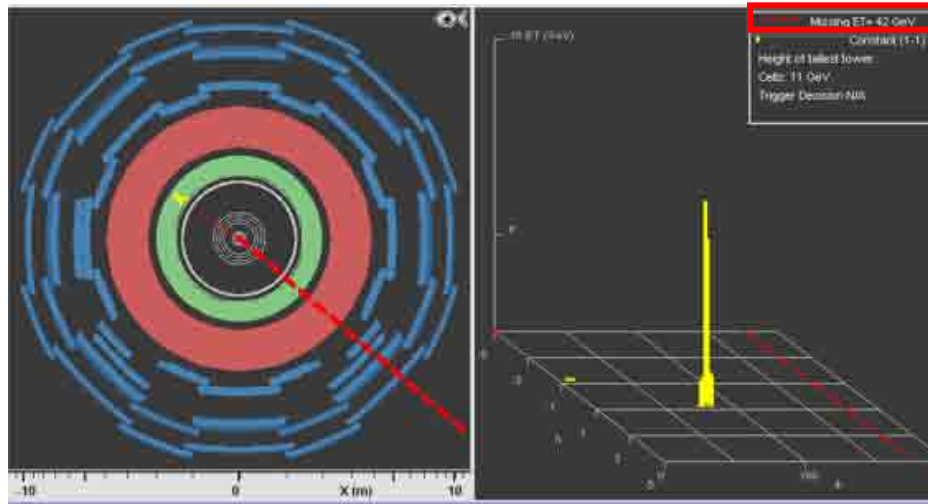
(e, μ oder ihre Antiteilchen)...

- ...das von Jets isoliert ist
- ...mit **PT > 20 GeV**



Signalereignis 1: So erkennt man W-Zerfälle

- Das Ereignis enthält ein energiereiches Neutrino:
Missing ET > 25 GeV (2013) > 20 GeV (2014)



← Fehlende transversale Energie
„Missing ET“

Darstellung als
rot gestrichelte Linie
(nur im Querschnitt)



Signalereignis 1: So erkennt man W-Zerfälle

- Es enthält genau ein **elektrisch geladenes Lepton**
 - ...das von Jets isoliert ist
 - ...mit **PT > 20 GeV**

So bestimmt man PT und die elektrische Ladung:

- Klick auf Spurauswahl-Werkzeug
- Klick auf Spur des Teilchens
- Unten rechts: PT, Ladungsvorzeichen ablesen





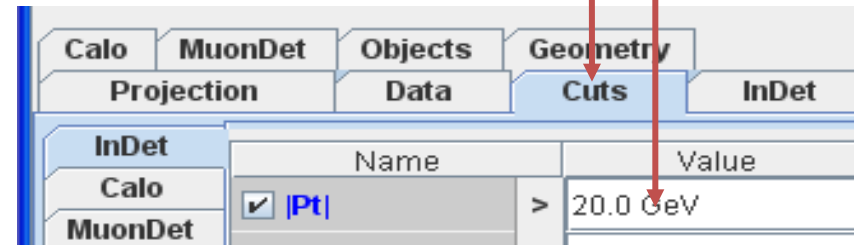
Praxistipp: Cut einstellen

Oft sind sehr viele Spuren im Spurdetektor zu sehen.
Du kannst **Spuren mit niedrigem Impuls ausblenden**:

Ø Gib in der Registerkarte „Cuts“

im Feld **IPtI** einen Wert (z.B. 5 GeV) ein.

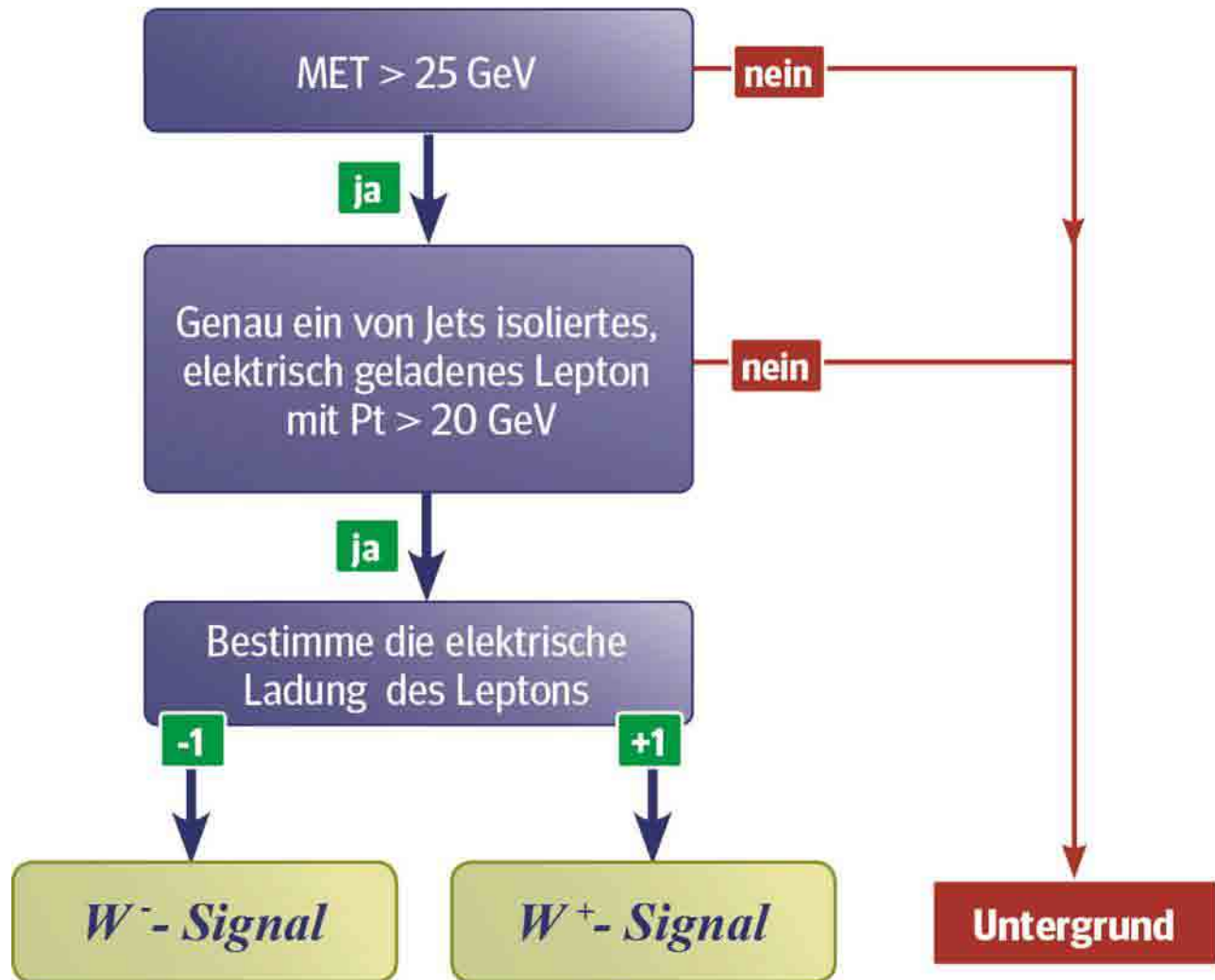
Ø Spuren mit kleinerem PT werden ausgeblendet.



Gib danach wieder einen niedrigen Impuls ein!
Sonst kannst du keine Jets identifizieren.



Signalereignis 1: So erkennt man W-Zerfälle (2013)

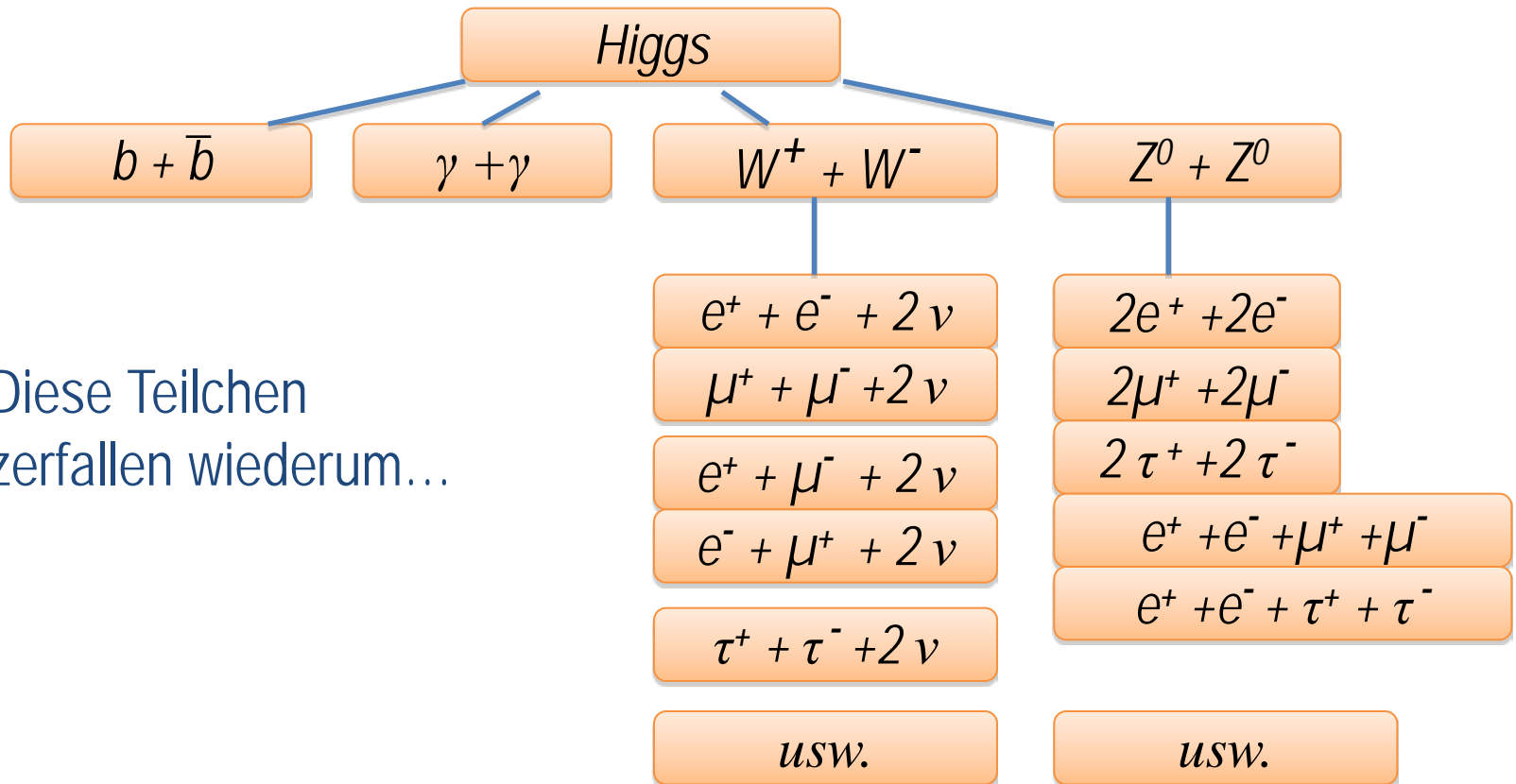




Entdecke das Higgs-Boson!

Das Higgs-Boson muss massereich und elektrisch neutral sein.

∅ In welche Teilchen könnte es zerfallen?

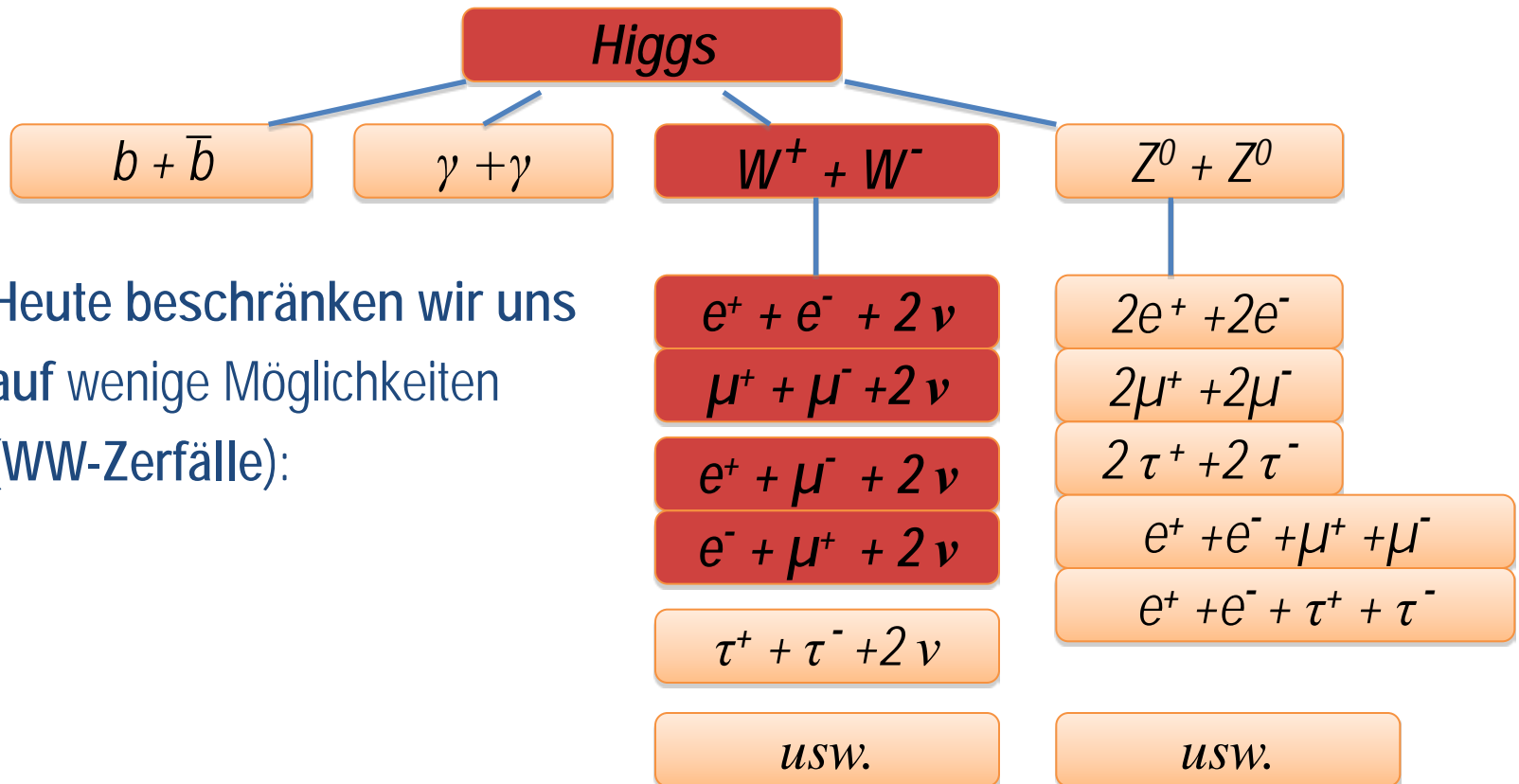


Diese Teilchen zerfallen wiederum...



Entdecke das Higgs-Boson!

Das Higgs-Boson muss massereich und elektrisch neutral sein.
Ø In welche Teilchen könnte es zerfallen?



Heute beschränken wir uns auf wenige Möglichkeiten (WW-Zerfälle):

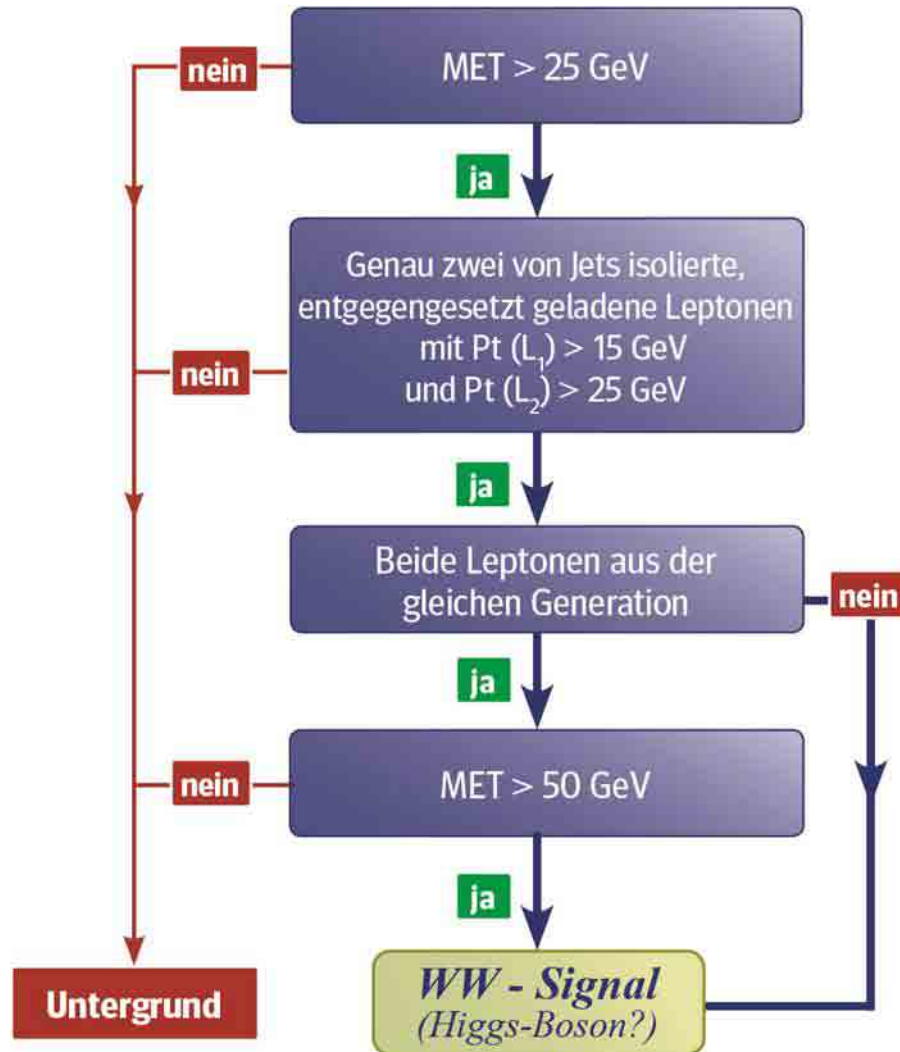


Signalereignis 2: So erkennt man Ereignisse mit W-Paaren

Checkliste:

- Im Ereignis fehlt viel Energie
 - ...bei gleichartigen Leptonen: **Missing ET > 50 GeV (2013) 40 GeV (2014)**
 - ...bei nicht gleichartigen Leptonen: **Missing ET > 25 GeV (2013) 20 GeV (2014)**
- Das Ereignis enthält genau **zwei entgegengesetzt elektrisch geladene Leptonen** (e^+ , e^- , μ^+ , μ^-)
 - ...die von Jets isoliert sind
 - ...eines trägt **PT > 15 GeV (2013) 10 GeV (2014)**
 - ...das andere **PT > 25 GeV (2013) 20 GeV (2014)**

Signalereignis 2: So erkennt man W-Paare (2013)

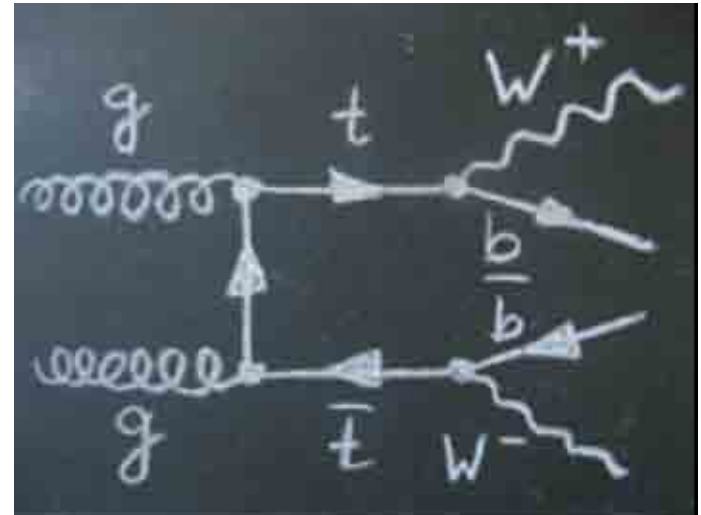
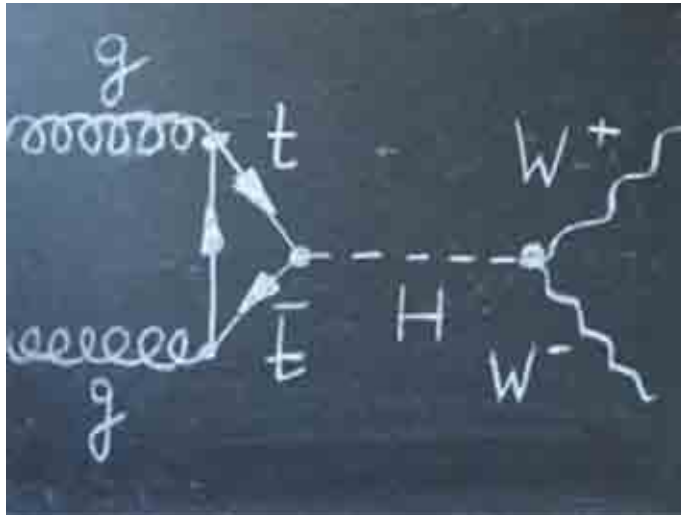




Higgs-Boson oder Untergrund?

Zwei W-Bosonen können von einem Higgs-Boson stammen...

...aber sie können auch anders entstanden sein (Untergrund), z.B. so:

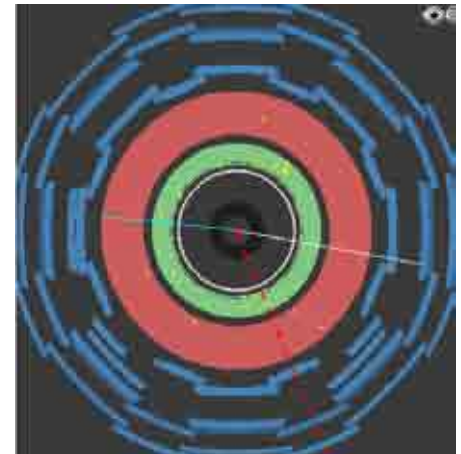


∅ Wie können wir Higgs-Bosonen von Untergrund unterscheiden?



Higgs-Boson oder Untergrund?

- Um zwischen Higgs-Zerfällen und Untergrund zu unterscheiden, misst man den Winkel $\Delta\Phi$ zwischen den beiden Leptonen (senkrecht zum Strahlrohr).
- Winkelmessung:
 - Spurauswahl-Werkzeug anklicken
 - P-Taste gedrückt halten, beide Spuren markieren
 - Der Winkel $\Delta\Phi$ wird in der Infobox angezeigt





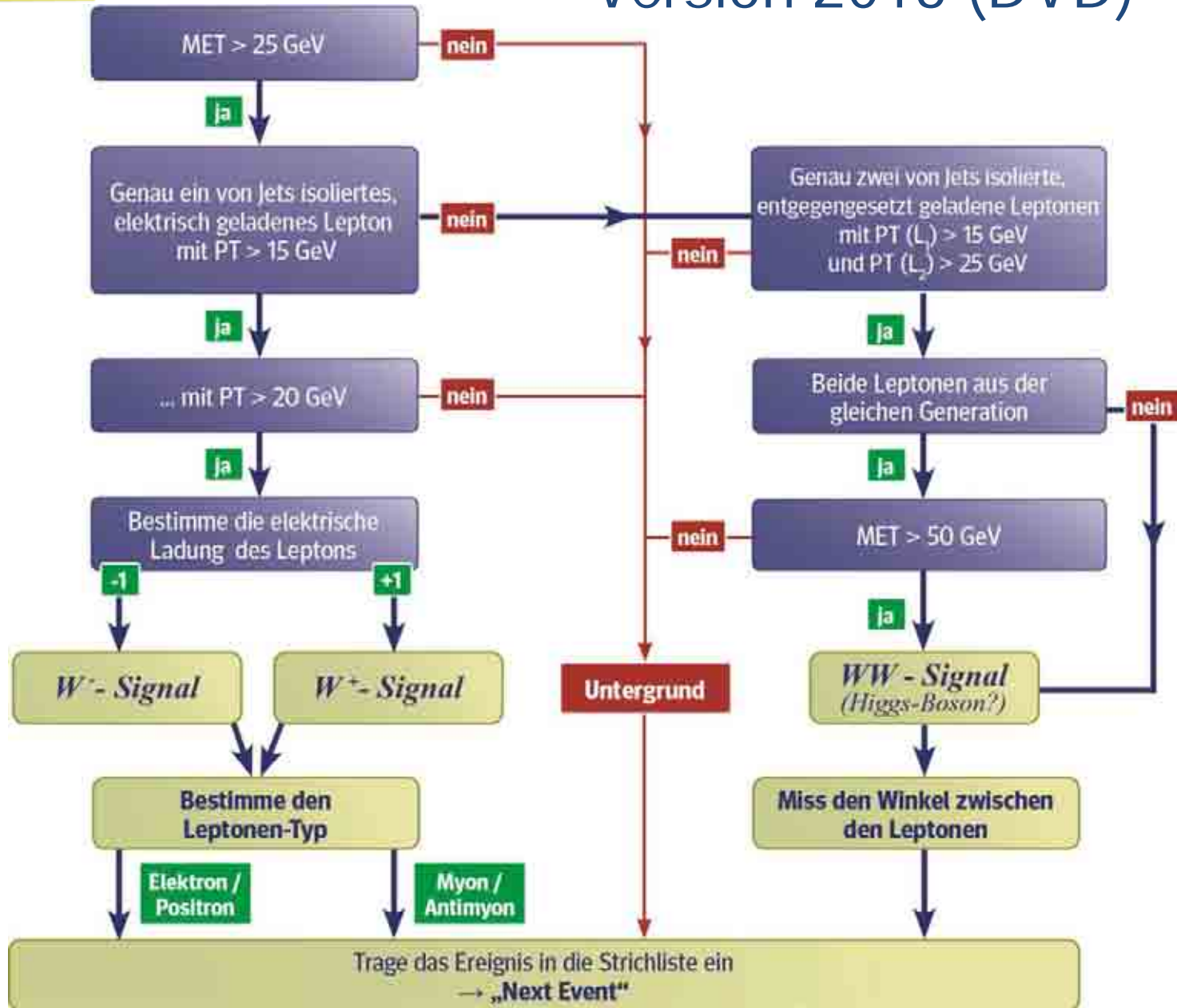
Jetzt sind Sie dran!

International Masterclass (W-Pfad 2014):

- MINERVA (Version 2014) herunterladen:
<http://kjende.web.cern.ch/kjende/downloads/minerva2014.zip>
- Übung 1: http://atlas.physicsmasterclasses.org/de/wpath_exercise1.htm
- Übung 2: http://atlas.physicsmasterclasses.org/de/wpath_exercise2.htm

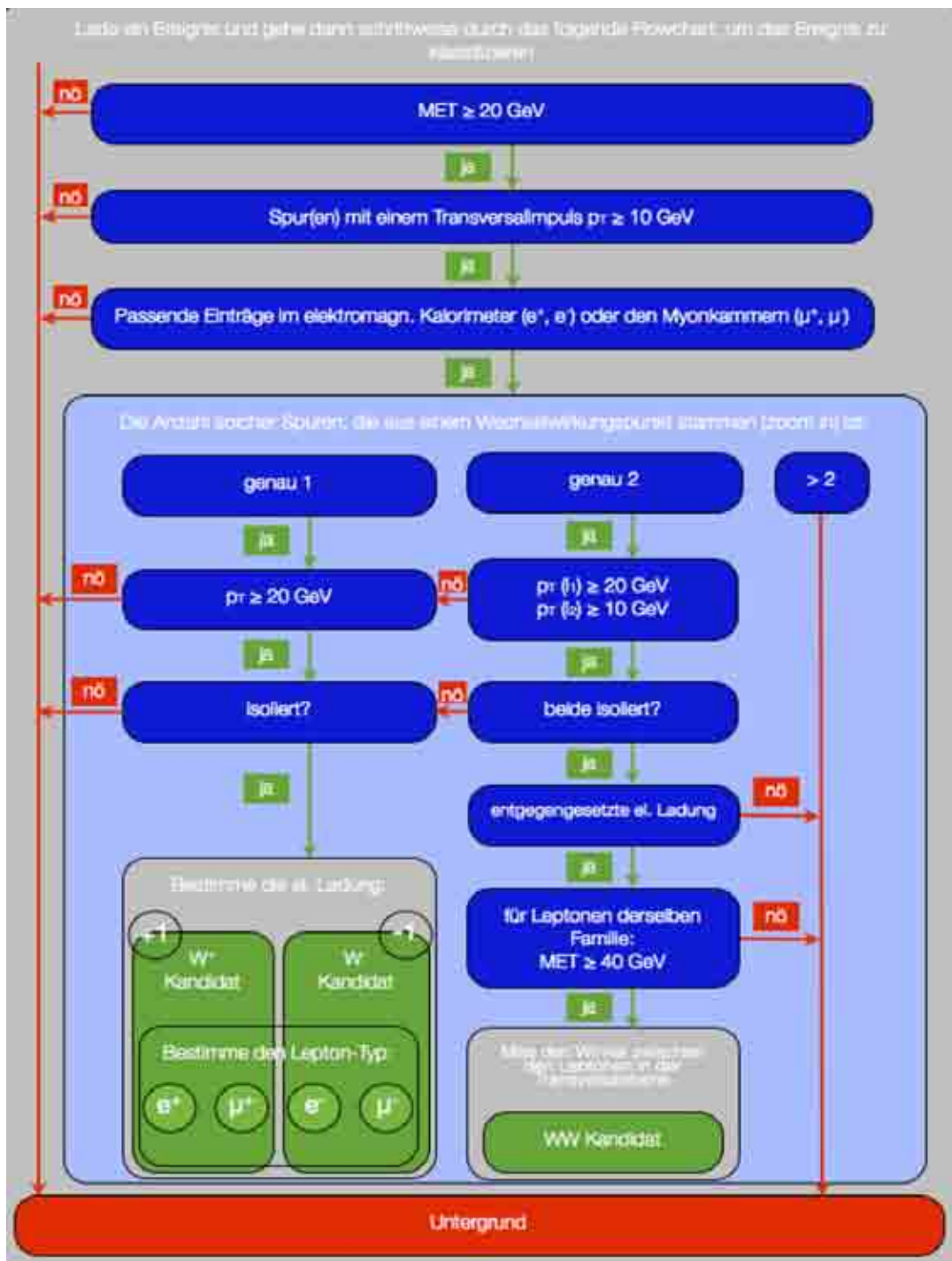
- HEUTE nicht (gerne am Wochenende von zu Hause)
- Datenpaket herunterladen und in Minerva öffnen:
http://www.cern.ch/kjende/de/wpath_data2014.php
Nutzer: MC2014 Passwort: ATLAS.is.great
- Jedes Datenpaket (Buchstabe A-T) umfasst Ereignisbilder aus 50 Kollisionen.
- Man durchsucht sein Datenpaket nach Signalereignissen für W- und WW-Zerfälle und trägt sie in einer Strichliste ein.

Version 2013 (DVD)

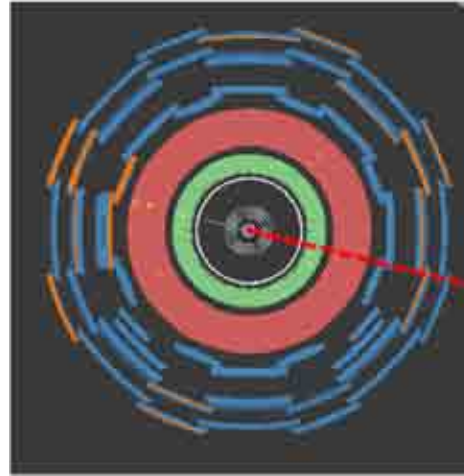




Version 2014
(online und
minerva2014
download)



Teil 3: Auswertung mit Jugendlichen





Was habt ihr warum gemacht?

- Welche Schwierigkeiten und Unklarheiten gab es bei der Datenanalyse?
- Warum haben wir nur nach Elektronen- und Myonenspuren gesucht?
 - Tauonen zerfallen zu schnell, um in den Detektor zu gelangen; ihre Zerfallsprodukte sind schwierig zu identifizieren
 - Quark-Antiquark-Paare entstehen bei vielen Arten von Ereignissen, nicht nur beim Zerfall von W-Bosonen – es wäre schwierig, dazwischen zu unterscheiden.



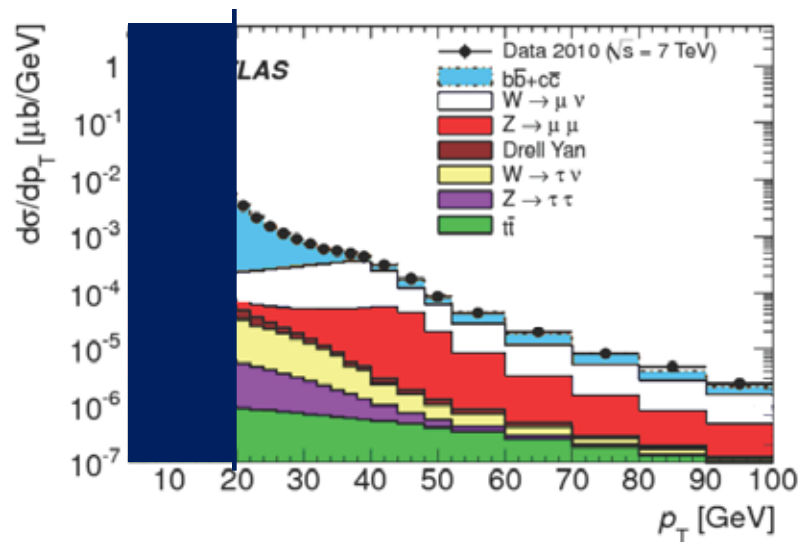
Was habt ihr warum gemacht?

- Wie kamen die Kriterien für die Signalereignisse (W- und WW-Zerfälle) zustande?
 - Die Ladungen von W-Bosonen sind bekannt.
 - Ladungen vorher = Summe der Ladungen nachher!
 - Daraus kann man auf die Teilchenkombinationen schließen, in die W-Bosonen zerfallen können.
 - Bei Higgs-Bosonen ist es ganz ähnlich.
- Wie kamen die Grenzen für PT und Missing ET zustande?
 - Higgs- und W-Bosonen sind sehr massereich.
 - Ihre Zerfallsprodukte sind viel leichter; also müssen sie sehr schnell sein bzw. eine hohe Bewegungsenergie haben.
 - Die optimalen Grenzen wurden durch Simulationen bestimmt.



Kriterien für die Suche nach W-Bosonen

- Die optimalen Grenzen für PT und Missing ET wurden durch Simulationen aus dem Standardmodell bestimmt.

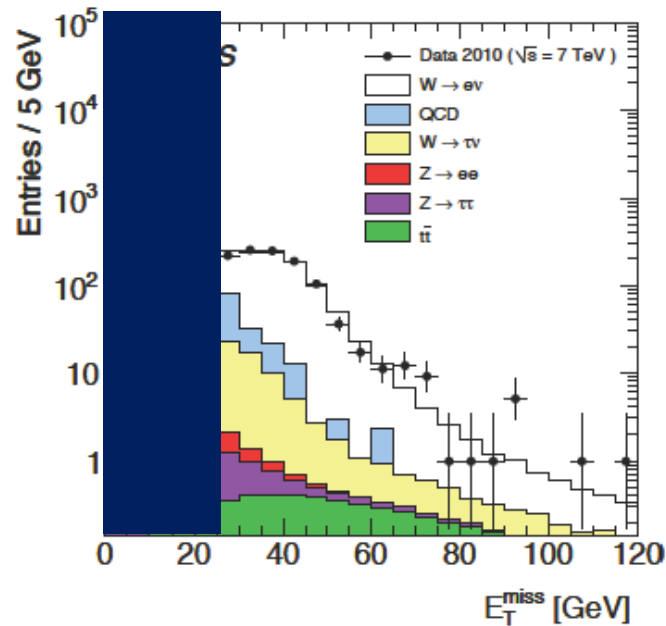


- **Y-Achse:** Anzahl von Ereignissen, die ein Myon enthalten (abhängig vom PT des Myons)
 - **Weiß:** Nur dieser Anteil der Ereignisse stammt von W-Bosonen!
 - Der Rest stammt von anderen Prozessen.
- Ereignisse mit $p_T < 20$ GeV kann man vernachlässigen, weil sie nur wenige W-Bosonen enthalten.
 - Auf ähnliche Weise lassen sich p_T - und MET-Grenzen für die Suche nach Higgs-Bosonen und anderen Teilchen festlegen.



Kriterien für die Suche nach W-Bosonen

- Auf ähnliche Weise lassen sich Grenzen für die fehlende Energie festlegen:



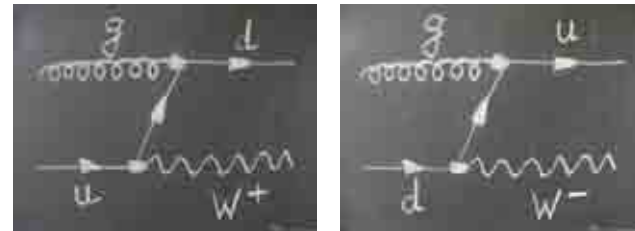
- **Y-Achse:** Anzahl von Ereignissen, die ein Elektron und fehlende Energie enthalten
- **Weiß:** W-Bosonen (Simulation)

- Ereignisse mit wenig fehlender Energie (< 25 GeV) kann man weglassen, weil sie nur wenige W-Bosonen enthalten.

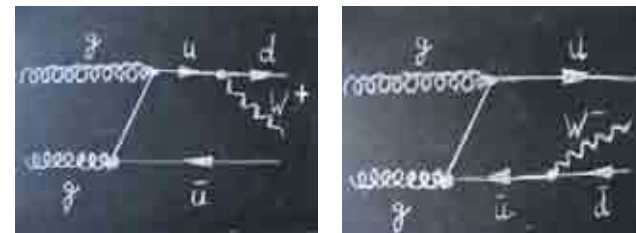


Das W^+ / W^- -Verhältnis

- Welches Verhältnis von W^+ und W^- -Bosonen hattet ihr erwartet? Was könnte ein Grund für ein abweichendes Ergebnis sein?
 - Bei Protonen-Kollisionen können W-Bosonen bei Quark-Gluon-Wechselwirkungen entstehen. Hierbei entstehen doppelt so viele W^+ wie W^- .



- Doch W-Bosonen entstehen auch bei Gluon-Gluon-Wechselwirkungen:



- Bei diesen Prozessen entstehen W^+ und W^- gleich oft. Dadurch wird das Verhältnis verzerrt.



Ergebnisse

- Wie gut stimmt das gemessene Verhältnis mit dem Ergebnis von ATLAS überein? Worin können Gründe für Abweichungen liegen?

Measurement of the $W \rightarrow l\nu$ and $Z/\gamma^ \rightarrow ll$ production cross sections in proton-proton collisions at $\sqrt{s} = 7$ TeV
Authors: The ATLAS Collaboration (Submitted on 11 Oct 2010): <http://arxiv.org/abs/1010.2130>*

Vergleich mit ATLAS	Total	604	403	656	425	-	-
	Total W^+/W^-	Anzahl W^+	1260	Anzahl W^-	828	Anzahl $W^{++}W^-$	2088
	Verhältnis ATLAS	$ W^+ / W^- $		1,52	\pm	0,07	

- Wie beeinflusst die Anzahl der analysierten Ereignisse die Messunsicherheit?
 - Je mehr Daten, desto kleiner wird der gesamte relative Messunsicherheit



Datenmengen

- Warum ist es in der Teilchenphysik nötig, so viele Daten zu sammeln?
 - Higgs-Bosonen (bzw. generell exotische Teilchen) werden selten erzeugt: etwa einmal pro 10^{10} Kollisionen!
 - Welche Teilchen bei einer bestimmten Kollision entstehen, ist vom Zufall bestimmt. Man kann nur Häufigkeiten verschiedener Teilchenkombinationen, Winkel etc. vorhersagen.
 - Bei einigen Zerfallskanälen gibt es viel Untergrund, den man zum Teil nicht von den gewünschten Ereignissen unterscheiden kann.
Z.B. können WW-Paare auch durch allerlei Prozesse ohne Higgs-Boson entstehen.
 - Der relative Messfehler sinkt mit steigender Datenmenge.
 - Je mehr Daten man sammelt, desto sicherer kann man sein, ob es sich wirklich um eine Entdeckung handelt oder um Zufall.



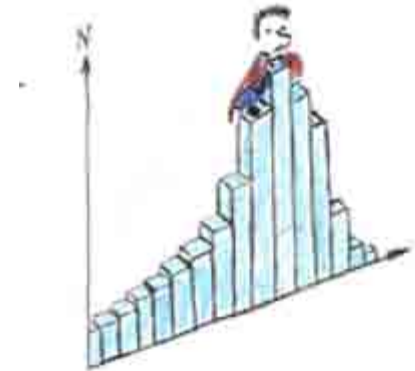
Die Suche nach exotischen Teilchen

- Wie suchen Forscher nach exotischen Teilchen (wie z.B. dem Higgs-Boson)?
 - Aus dem Standardmodell lässt sich theoretisch vorhersagen, in welche Teilchenkombinationen das Higgs-Boson zerfallen sollte. Nach diesen Zerfallsprodukten wird gesucht.
 - Aus den Eigenschaften der Zerfallsprodukte rekonstruiert man die Eigenschaften des ursprünglichen Teilchens, z.B. dessen Masse.
 - Die gemessenen Eigenschaften des neuen Teilchens werden mit den Vorhersagen des Standardmodells (oder anderer Theorien) verglichen: Ladungen, Winkelverteilung der Zerfallsprodukte, Häufigkeiten verschiedener Zerfallsprodukte etc.



Datenanalyse am CERN

- Auswahl „interessanter“ Kollisionen (Trigger)
- Zusammenfassung von benötigten Messgrößen (z.B. Winkel zwischen zwei Teilchen, Masse eines zerfallenen Teilchens...)
- ...oft in **Histogramm** (wie oft tritt ein bestimmter Wert auf?)
- Abschätzung von Messunsicherheiten
- Vergleich mit theoretischen Vorhersagen und Simulationen

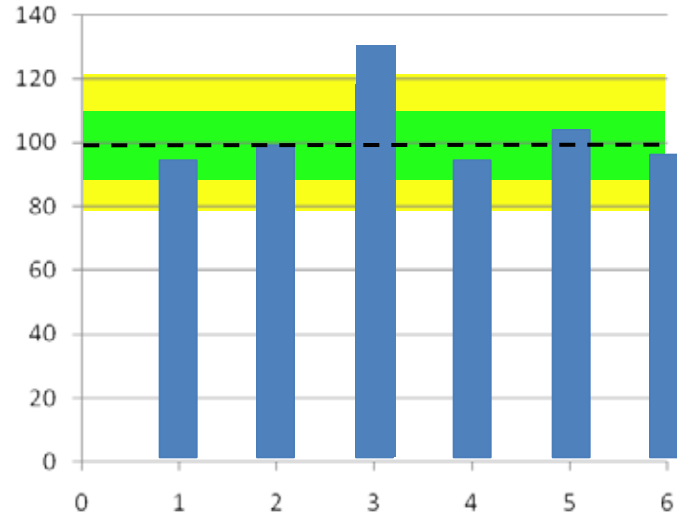
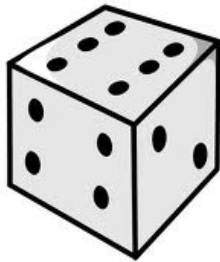


... das haben wir heute auch gemacht!



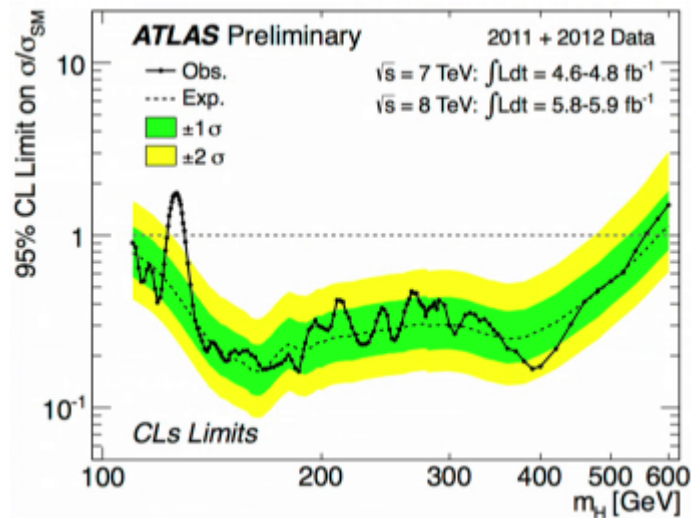
Warum so viele Kollisionen?

Ist der Würfel manipuliert oder nicht?



■ Daten
 - - Erwartung
■ $\pm 1\sigma$
■ $\pm 2\sigma$

Existiert das Higgs-Boson oder nicht?





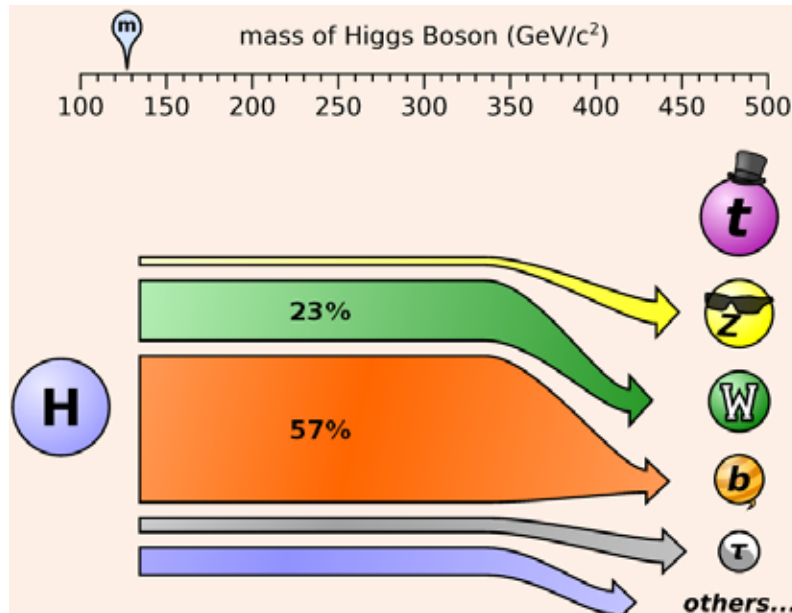
Datenanalyse am CERN

- Ist es so einfach, einen Nobelpreis zu bekommen?
Was unterscheidet die Datenanalyse mit MINERVA vom tatsächlichen Vorgehen am CERN?
 - Um z.B. das Higgs-Boson zu finden, sucht man nicht nur nach WW-Zerfällen, sondern nach verschiedensten Teilchenkombinationen.
 - Forscher suchen nicht manuell nach Signalereignissen, sondern programmieren spezielle Software, um automatisch Signalereignisse nach bestimmten Kriterien herauszufiltern.

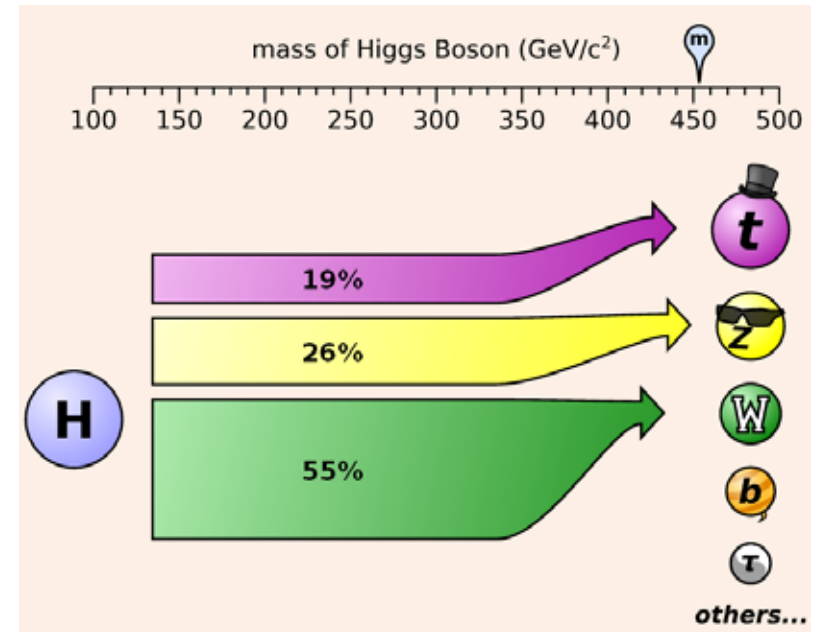


Wie zerfällt das Higgs-Boson?

- Wie häufig das Higgs-Boson in welche Teilchen zerfällt, ist von seiner Masse abhängig (Vorhersagen vom Standardmodell).
- Vergleich mit experimentellen Daten notwendig!



$m = 130 \text{ GeV}$



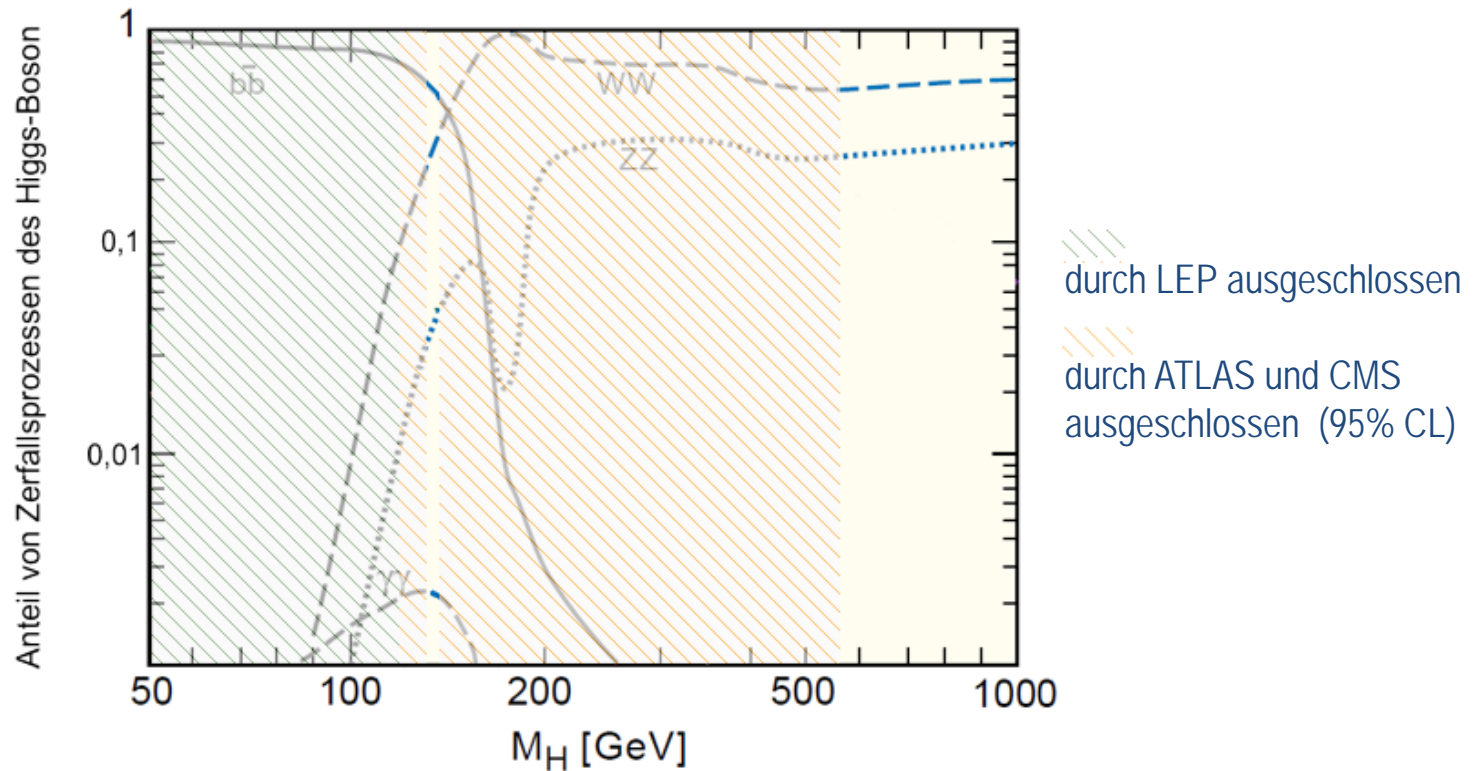
$m = 450 \text{ GeV}$

[Animation](#)



Wie zerfällt das Higgs-Boson?

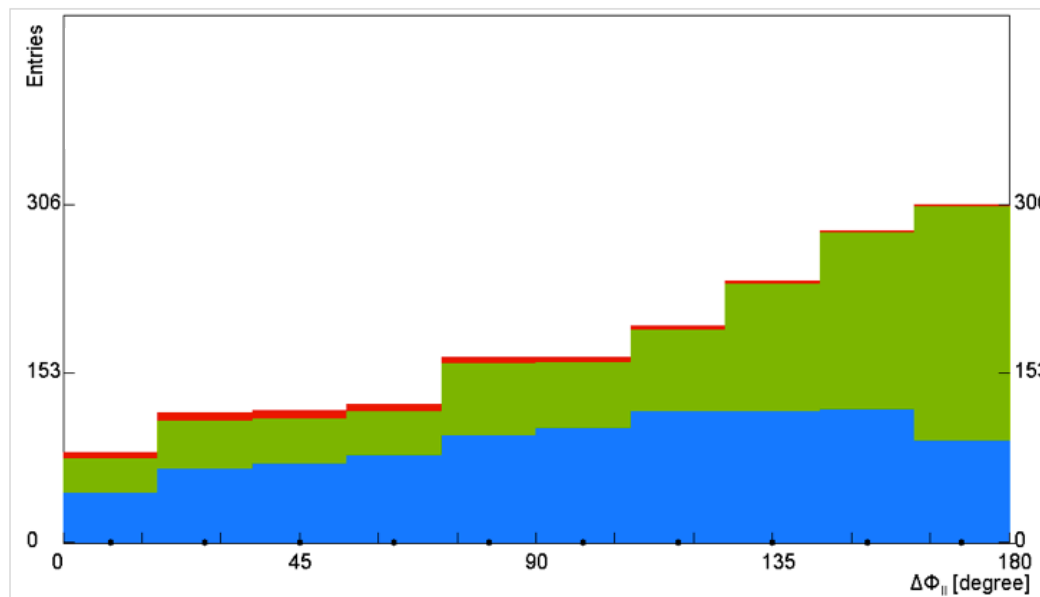
- Wie häufig das Higgs-Boson in welche Teilchen zerfällt, ist von seiner Masse abhängig (Vorhersagen vom Standardmodell).
- Vergleich mit experimentellen Daten notwendig!





Winkelverteilung von WW-Signalen

Das Standardmodell sagt die folgende Winkelverteilung für WW-Signale voraus:
(Winkel $\Delta\Phi$ zwischen den beiden Leptonen, senkrecht zum Strahlrohr):



WW-Paare aus Higgs-Zerfall
(Simulation, $m(\text{Higgs}) = 125 \text{ GeV}$)

Untergrund
- Fehlmessungen
- WW-Paare aus anderen Zerfällen

Untergrund
(WW-Paare entstanden direkt bei der Kollision, ohne Higgs)

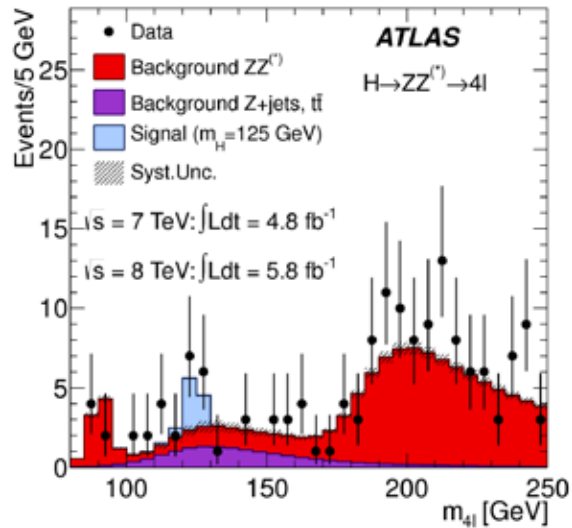
Higgs-Zerfälle sollten häufiger Winkel zwischen 0° und 90° ergeben als Untergrund-Ereignisse.

Ø Stimmen unsere Messergebnisse damit überein?



Higgs-Boson entdeckt!

Ergebnisse der ATLAS Collaboration vom 4.7.2012:



Nachweis eines bisher unbekanntes Teilchens:

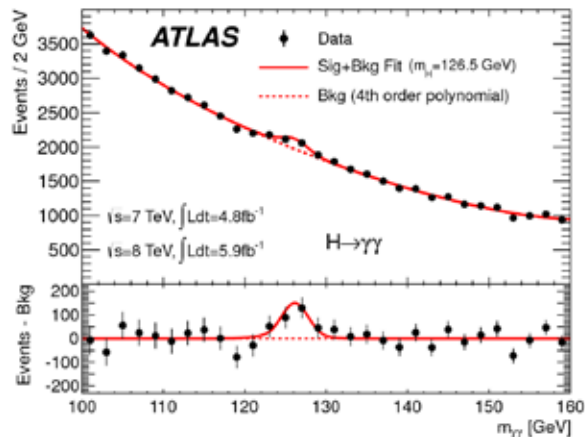
Masse: 126 GeV

Elektrische Ladung: 0

Spin: 0 (bevorzugt) oder 2

Die bisherigen Messungen passen zu den Standardmodell-Vorhersagen für das Higgs-Boson.

Weitere Messungen sind nötig!



Impressum

Autoren: Manuela Kuhar, Fabian Kuger
Kontakt: material@teilchenwelt.de

Bildnachweise:

- CERN: 5-12, 32,46,53,59
- Sony Pictures Releasing GmbH: 6, 32
- Netzwerk Teilchenwelt: 13, 16, 18-22, 26-31, 34, 43, 45, 73, 74, 78-81, 90, 94, 100
- The Nobel Prize in Physics 2008
© The Royal Swedish Academy of Sciences
(Illustration: Typoform) :15
- Wikipedia (Florian DO): 41

- International Particle Physics Outreach Group,
www.physicsmasterclasses.org: 42, 95, 106, 110, 113, 114
- Wikipedia (Sundance Raphael): 43
- LEIFI Physik, www.leifiphysik.de: 43
- ATLAS collaboration: 47-49, 58-69,82, 83, 86-89, 96, 101, 104, 105, 115
- Jochen Stuhmann / GEO / picture press: 51
- NASA/ESA: 6, 52
- Wikipedia (Jens Langner): 54
- GSI: 55
- Wikipedia (Anders): 56
- Air Force Link: 56
- ATLAS collaboration / Konrad Jende: 62, 71, 72
- The Particle Zoo,
www.particlezoo.net: 74-81, 84, 85
- Fermilab: 112

ORIGINALSCHAUPLATZ



PARTNER



SCHIRMHERRSCHAFT



PROJEKTLEITUNG



GEFÖRDERT VOM

