

# Masterclasses upgraded

Die Suche nach dem Higgs-Boson

Workshop mit echten LHC Daten des ATLAS-Experimentes

# Vorschau

- Einführung
- Pause
- Übungen
- Messung
- Diskussion



- Verstehen wie Physiker das Higgs-Boson nachweisen wollen
- Teilchen identifizieren und Ereignisse klassifizieren können
- Einblick gewinnen in die tägliche Arbeit an einem Teilchenbeschleunigerexperiment



# Teil 1 - Einführung

## Daten zu Bildern 1

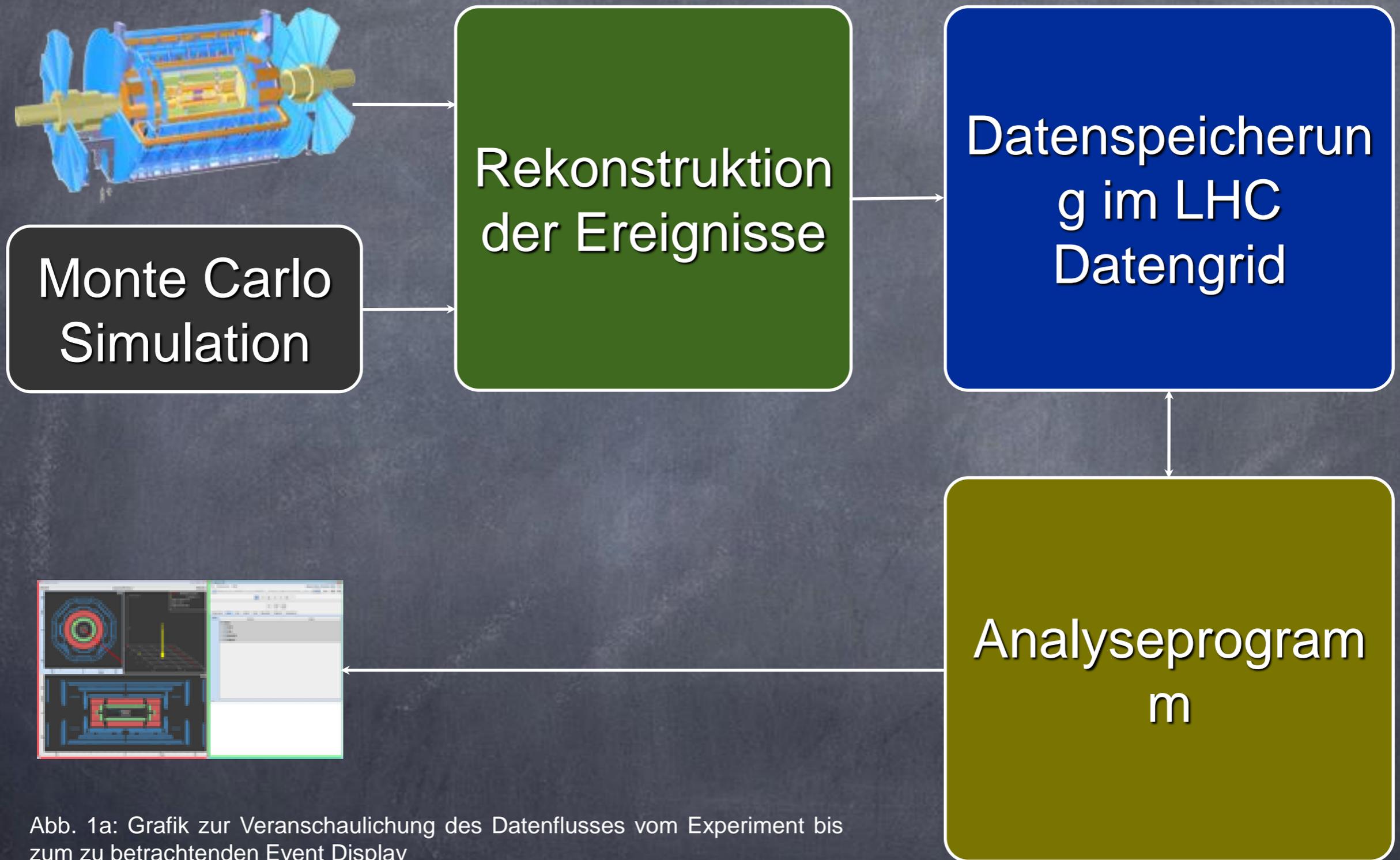


Abb. 1a: Grafik zur Veranschaulichung des Datenflusses vom Experiment bis zum zu betrachtenden Event Display



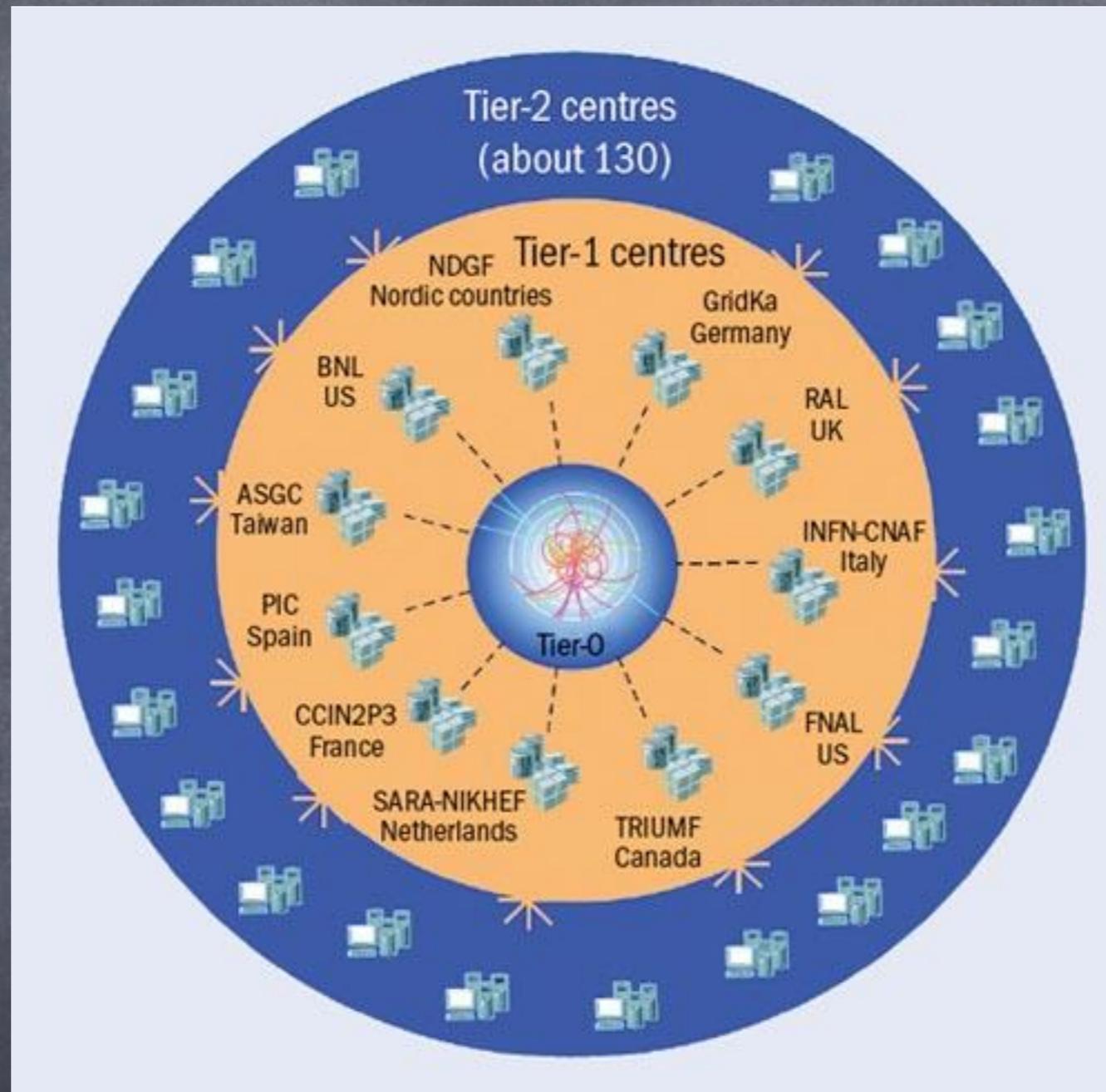


Abb. 1b: Aufbau des Worldwide LHC Computing Grid (WLCG)



<http://dashb-earth.cern.ch/?vo=atlas>



# Einführung

- ATLAS-Detektor
- Physik
  - W-Boson
  - Higgs-Boson



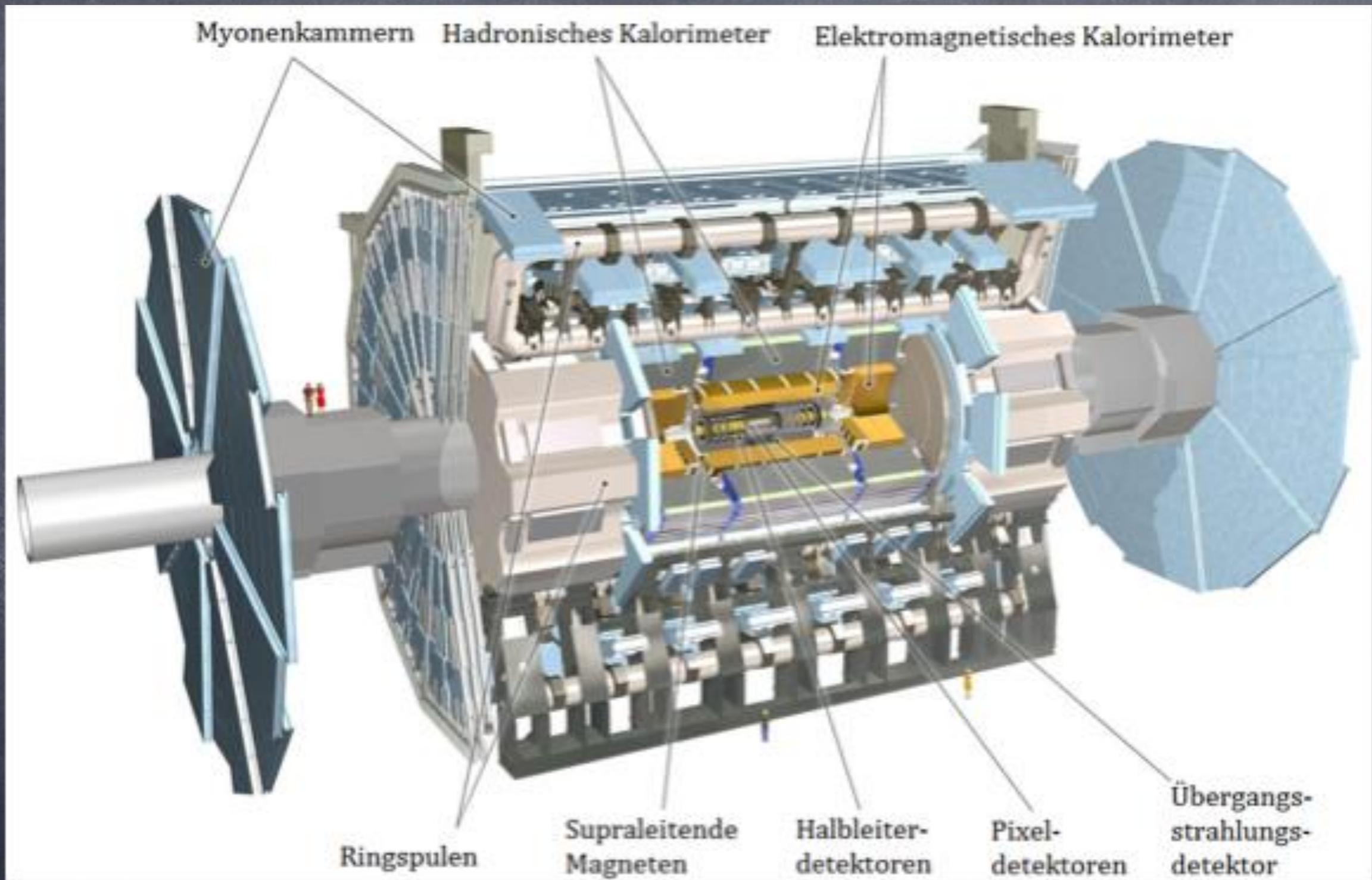
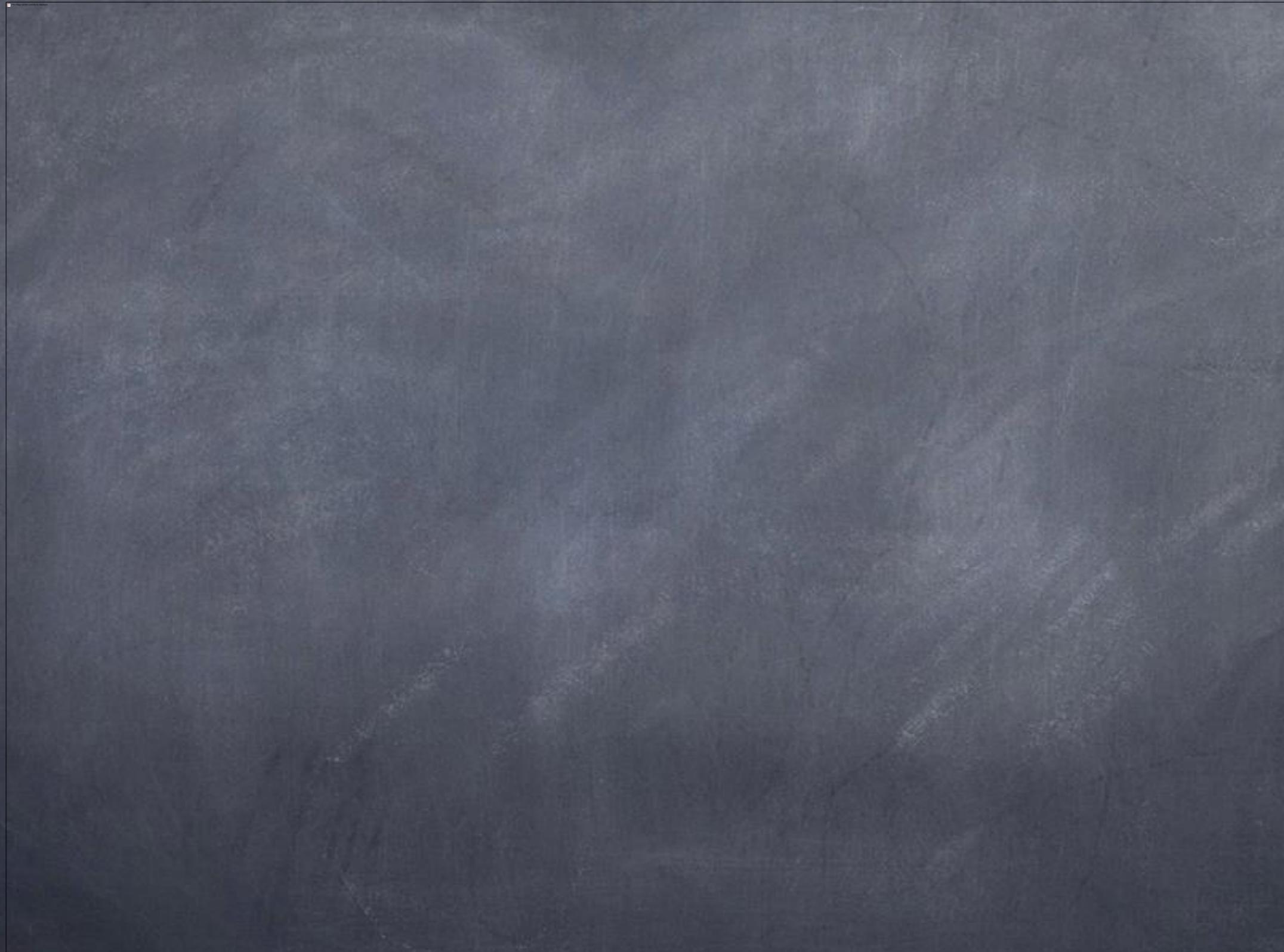
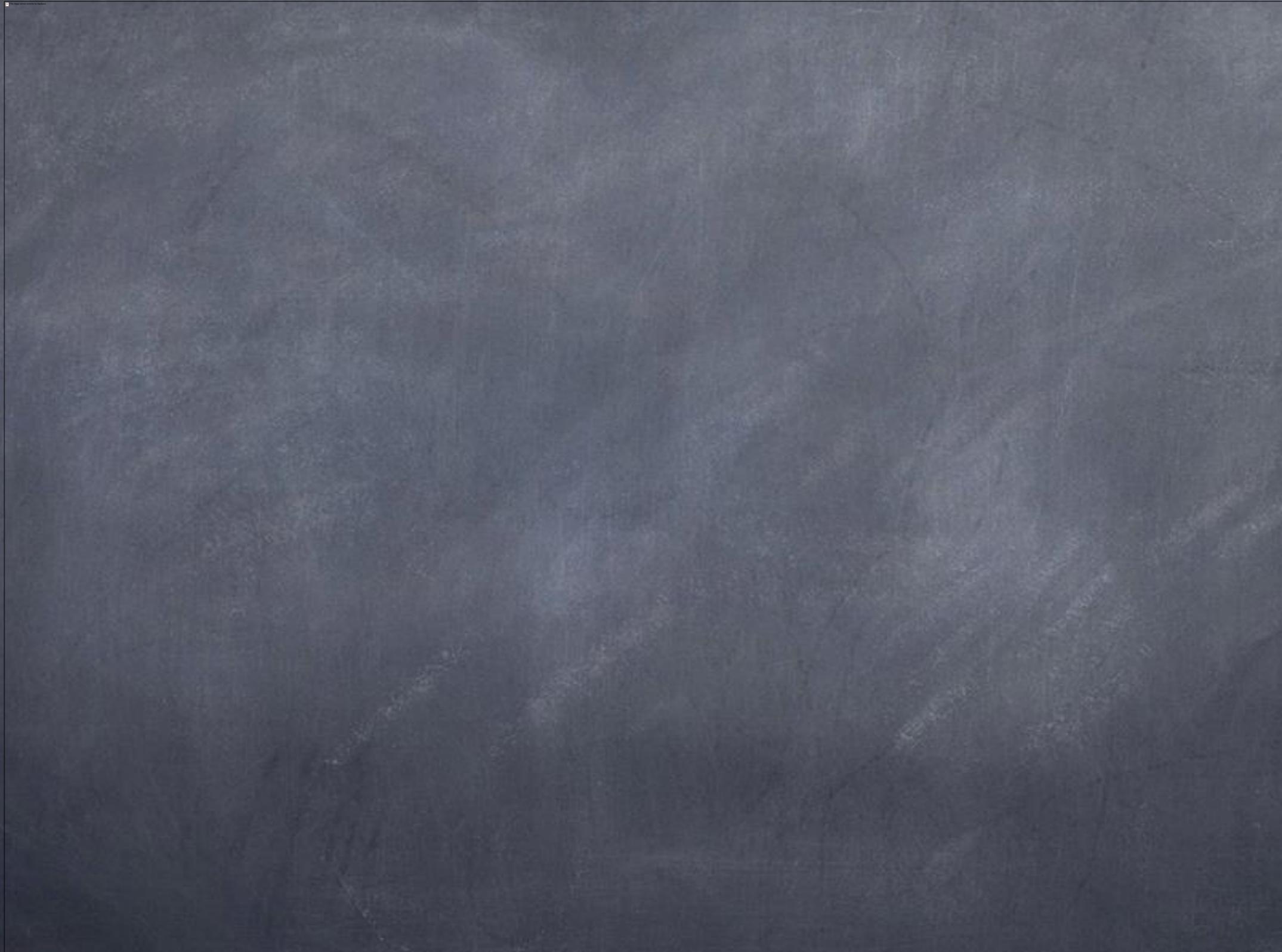


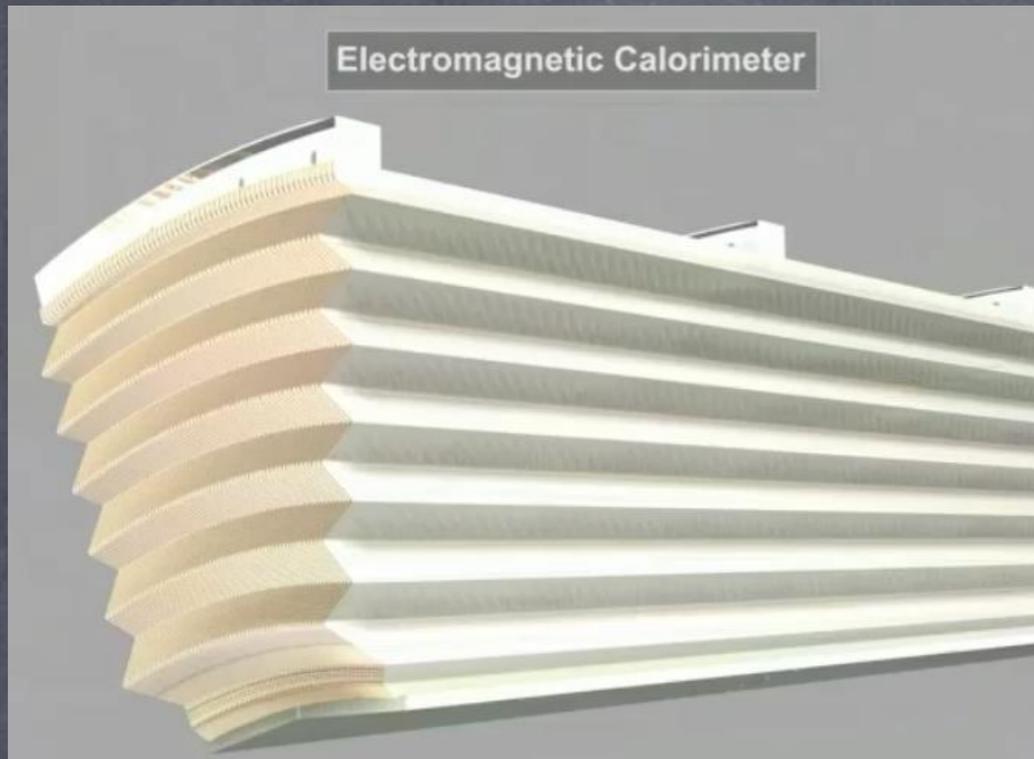
Abb. 2: ATLAS-Detektor mit seinen wichtigsten Komponenten



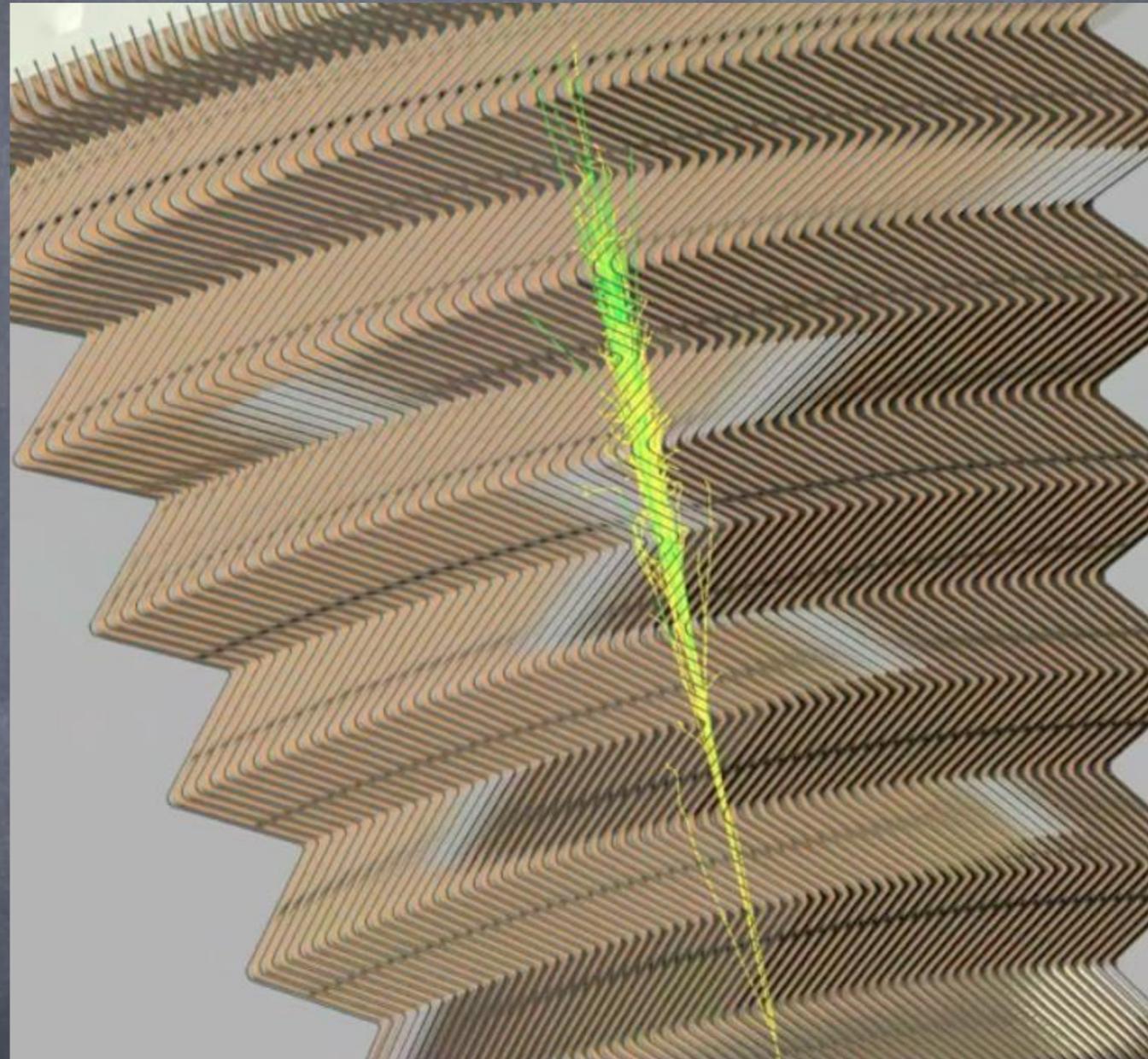




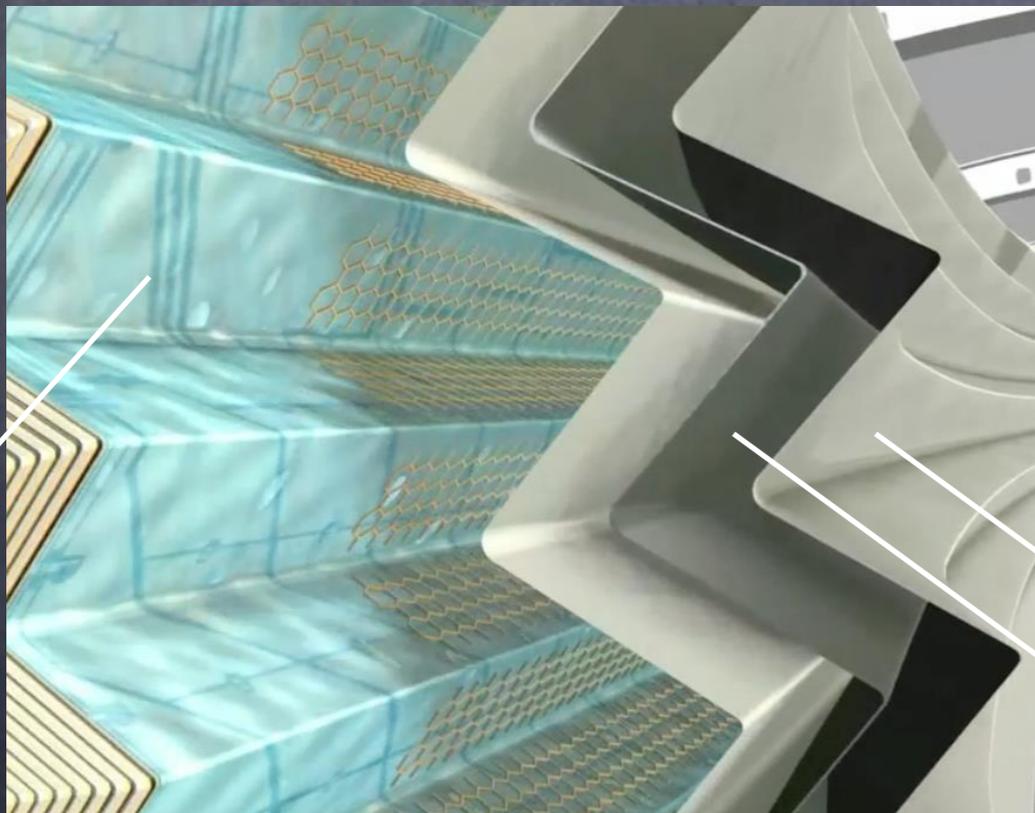
# Teil 1 - Einführung



# Teilchenidentifikation 4



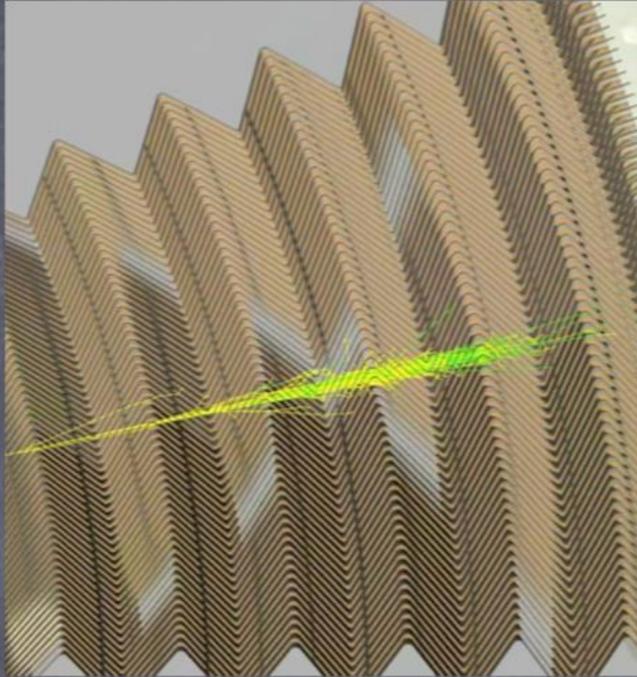
Flüssiges Argon (-185°)



Blei, Stahl



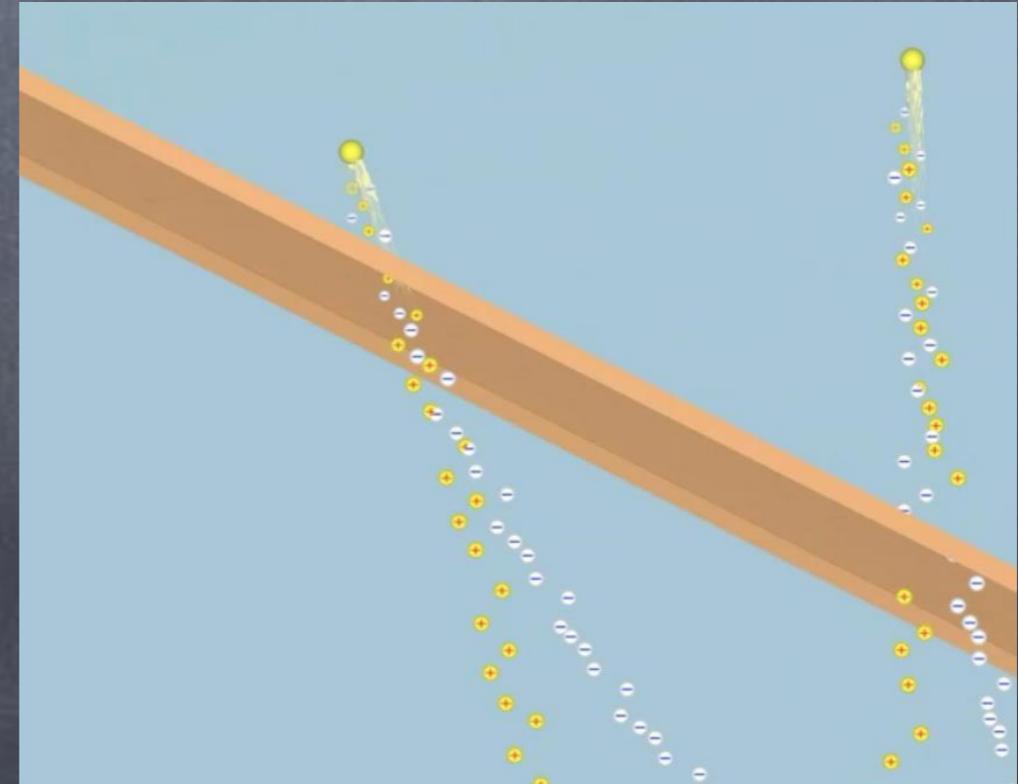
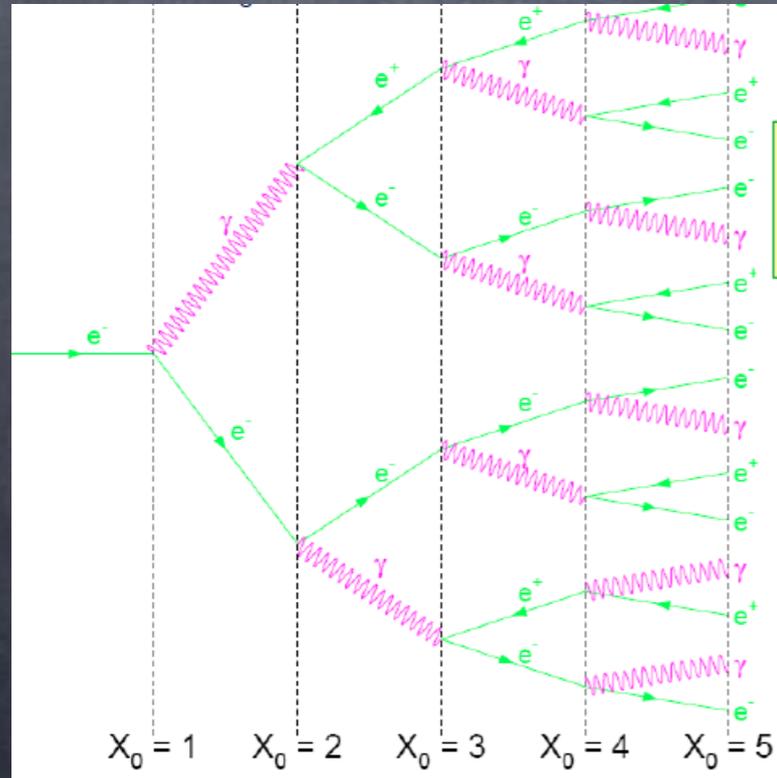
## Teil 1 - Einführung



## Teilchenidentifikation 5

Elektronen wechselwirken über:  
Bremsstrahlung im Kernfeld  $\sim Z^2 E/m^2$

Myonen wechselwirken über  
Ionisation und Photonen über:  
Paarerzeugung



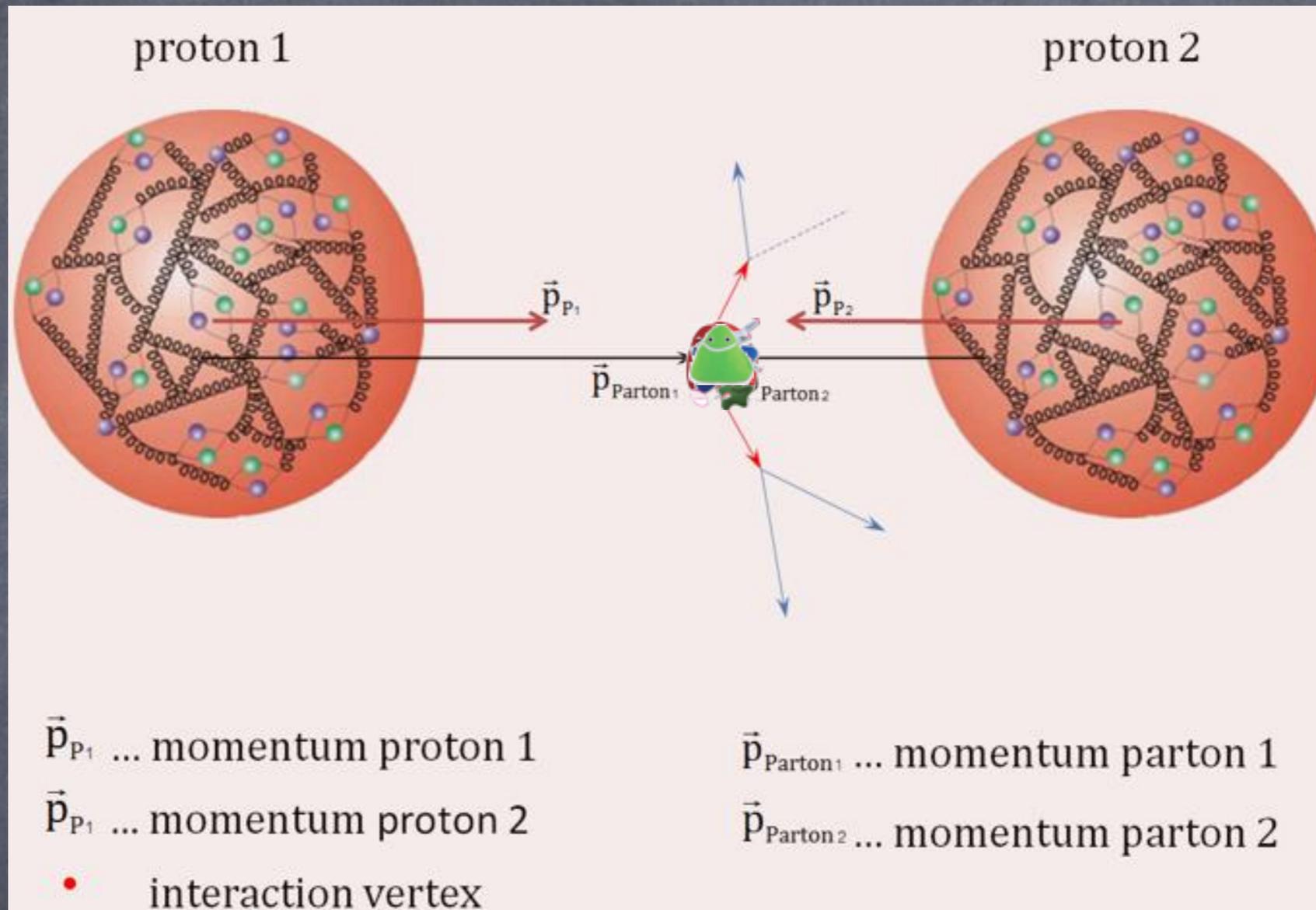


Abb. 3: Struktur des Protons und Impulsbetrachtungen bei der Wechselwirkung



# Konzentration auf ein Teilchen



Warum ist das W-Boson interessant?

- Kernfusion
- Anwendung Radioaktivität in Medizin (Szintigrafie), Kunst und Archäologie (Altersbestimmung)
- Schwache Wechselwirkung ermöglicht Familienwechsel



# Teil 1 - Einführung

## Produktion - W-Boson

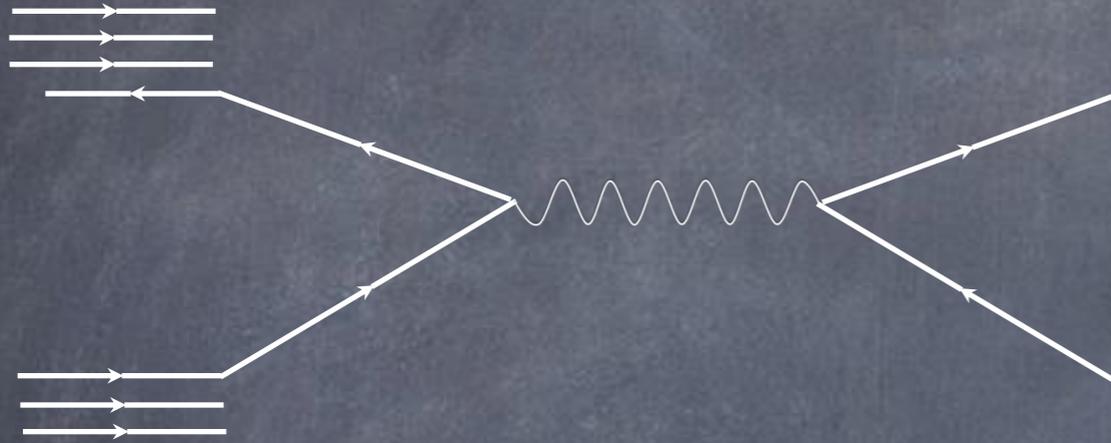


Abb. 4: Quark-Antiquark-Annihilation und Produktion eines W-Bosons (Häufigster Prozess)

In einem 10 Stunden Lauf des LHC werden bei  $L=10^{34}\text{cm}^{-2}\text{s}^{-1}$  36.000.000 W-Bosonen produziert. Seit Beginn von ATLAS waren es ca. 500 Millionen.

# Physik 3

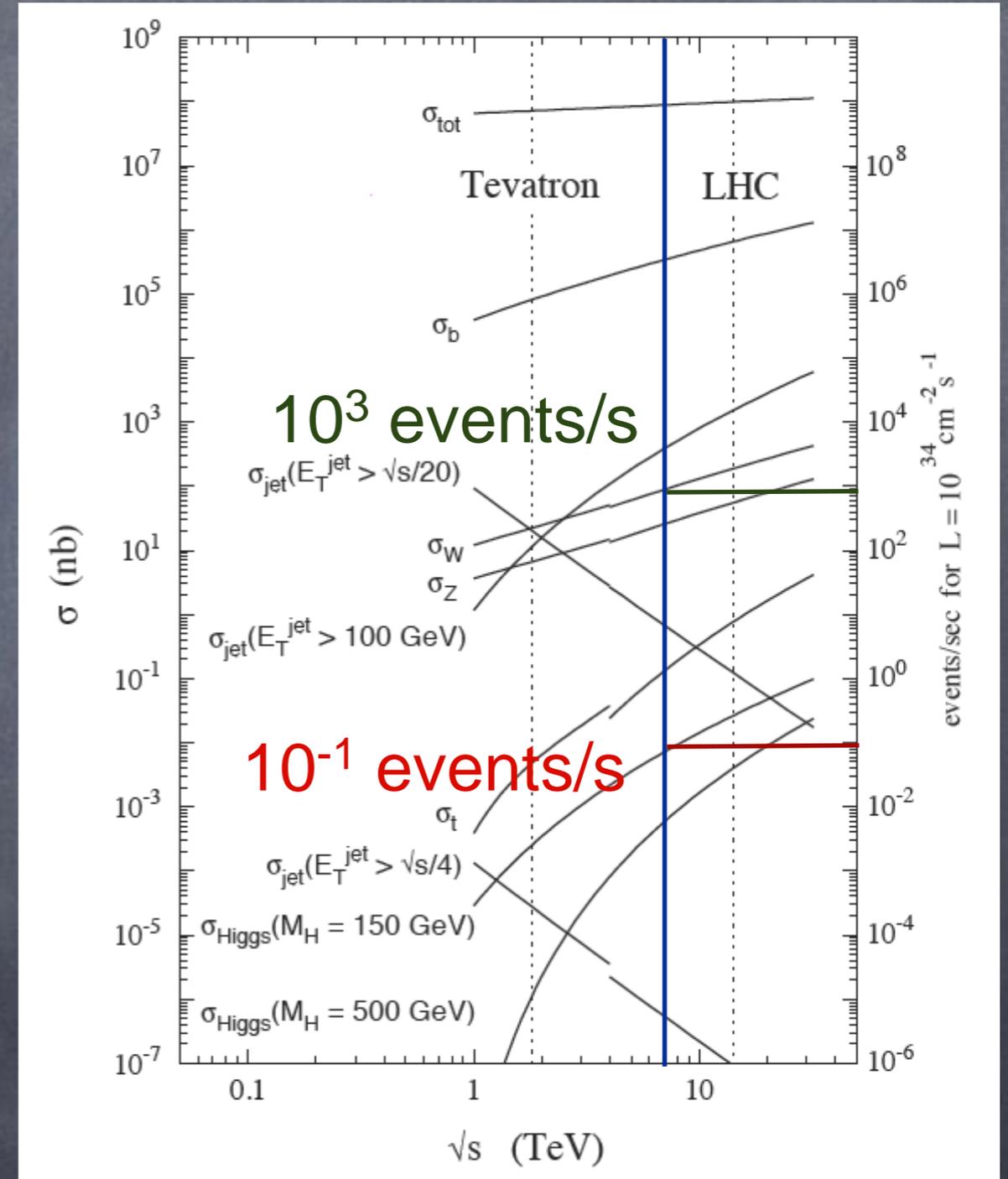


Abb. 5: Wirkungsquerschnitt für Teilchenproduktionen bei hohen Schwerpunktsenergien, aus [3]

# Teil 1 - Einführung

# Physik 3

## Produktion - W-Boson

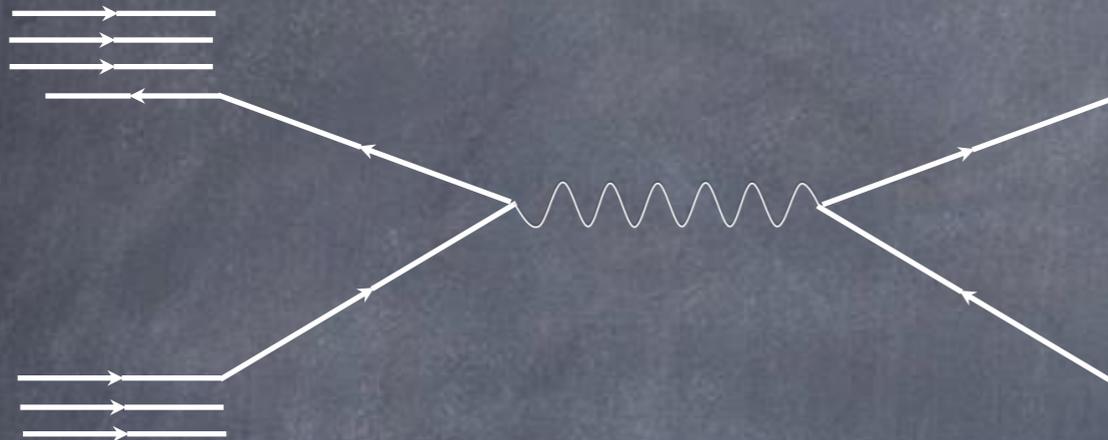


Abb. 4: Quark-Antiquark-Annihilation und Produktion eines W-Bosons (Häufigster Prozess)

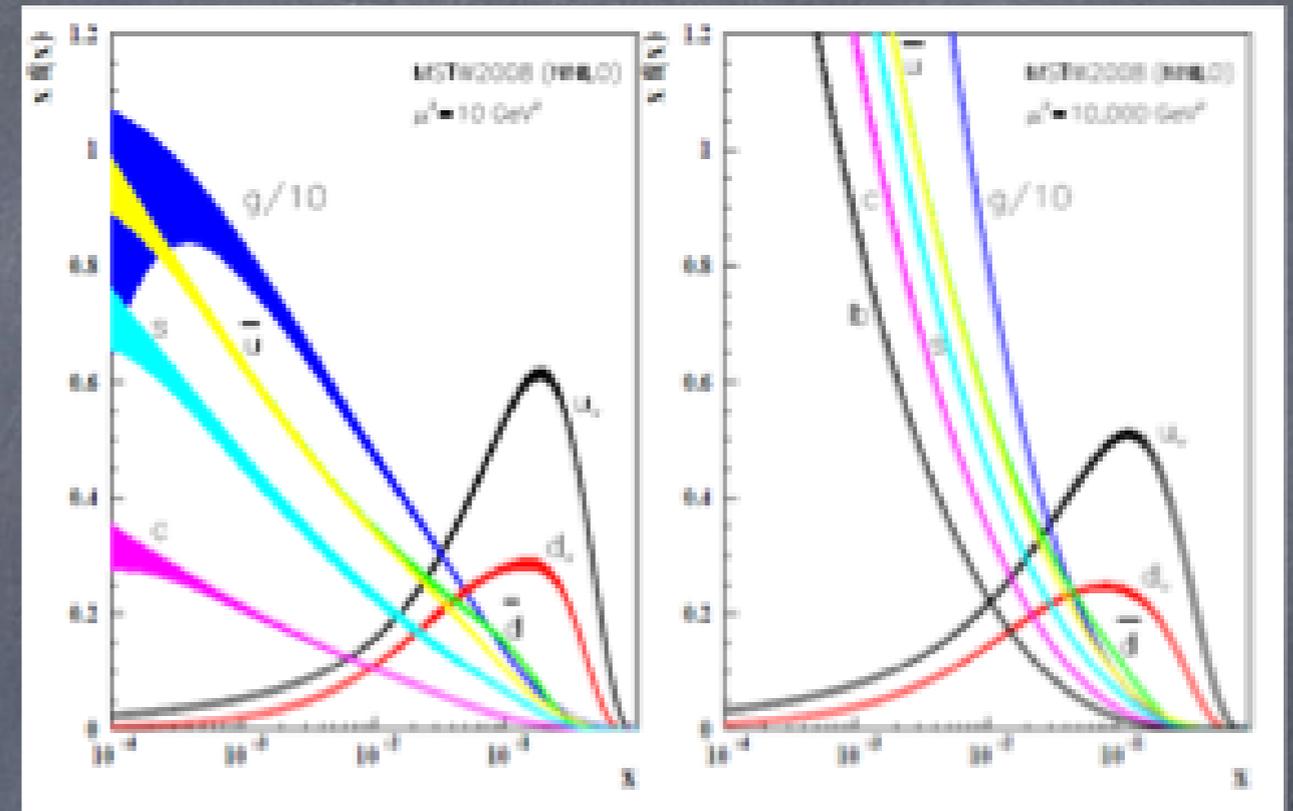


Abb. 6: PDF - Maß für Wahrscheinlichkeit ein Parton im Proton mit dem Impulsanteil  $x$  anzutreffen

Messaufgabe zu den W-Teilchen:

- Finden Sie in Ihrem Datenpaket Ereignisse in denen vermutlich ein W-Teilchen erzeugt wurde.
  - Bestimmen Sie bei diesen Ereignissen die elektrische Ladung des W-Teilchens.
1. Bestimmen Sie das Verhältnis der Ereigniszahlen von  $W^+$  zu  $W^-$ , genauer:  $R_{\pm} = |W^+|/|W^-|$

Welchen Wert für  $R_{\pm}$  erwarten Sie? Begründen Sie diese Entscheidung.



## Zerfall - W-Boson

W-Boson

Lebensdauer:  $\approx 10^{-25}\text{s}$

Masse:  $80.39 \pm 0.02 \text{ GeV}/c^2$

Zerfallsraten in %:

hadronisch: 67.6%

leptonisch: 32.4%

davon e, $\mu$ : 21.3%

Prod. LHC-ATLAS:

$\sigma_{\text{th}}$ : 100nb

$\sigma_{\text{th}}(e,\mu)$ : 17-21nb

$\sigma_{\text{tot}}(e,\mu)$ :  $10.2 \pm 1.8 \text{ nb}$  (Messung)

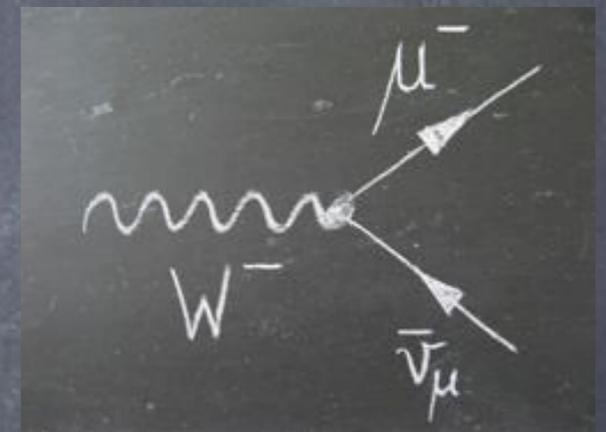
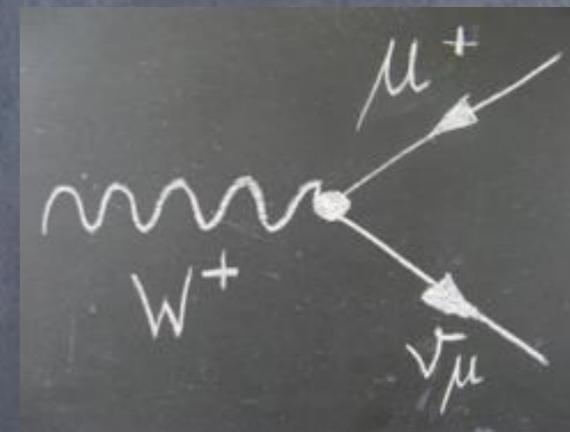
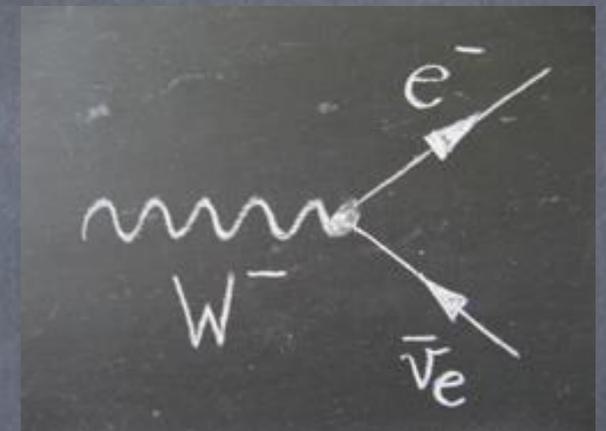
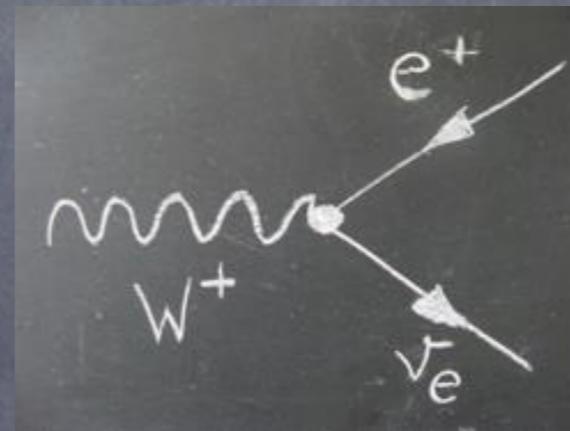


Abb. 7: Feynman-Diagramme zum Zerfall des W-Bosons in Lepton-Antileptonpaar der ersten beiden Familien



## Eigenschaften der Ereignisse mit zerfallenen W-Bosonen

- genau ein hochenergetisches, elektrisch geladenes Lepton [entweder Myon (bzw. Antimyon) oder Elektron (bzw. Positron)]
- fehlender transversaler Impuls als Zeichen für das nicht-detektierbare Neutrino
- elektrisch geladenes Lepton muss isoliert von Jet sein

## Zerfall - W-Boson

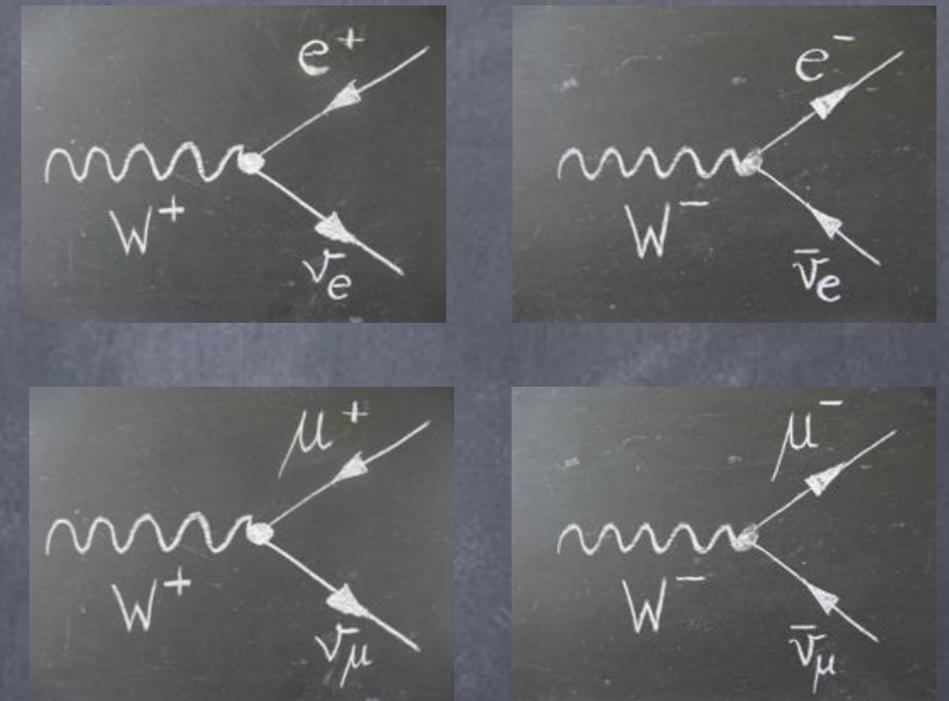


Abb. 7: Feynman-Diagramme zum Zerfall des W-Boson





# Teil 1 - Einführung

# Physik 6

- Produktion des W-Teilchens - häufigster Prozess: Quark-Antiquark-Annihilation  $u\bar{d} \rightarrow W^+$   
 → führt zu geringem transversalen Impuls des W-Bosons (siehe Abb. 8)

- Zerfall des W-Bosons in ein elektrisch geladenes und ungeladenes Leptonenpaar

$$\begin{pmatrix} m_W \\ E_W \\ p_{x,W} \\ p_{y,W} \\ p_{z,W} \end{pmatrix} \rightarrow \begin{pmatrix} m_l \\ E_l \\ p_{x,l} \\ p_{y,l} \\ p_{z,l} \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} m_\nu \\ E_\nu \\ p_{x,\nu} \\ p_{y,\nu} \\ p_{z,\nu} \end{pmatrix}$$

- in Ebene senkrecht zur Strahlrichtung → Messung des Impulsanteils des Neutrinos → messbar als **fehlender transversaler Impuls** (MET,  $E_T^{\cancel{e}}$ ,  $p_T^{\cancel{e}}$ ,  $E_{T,miss}$ )

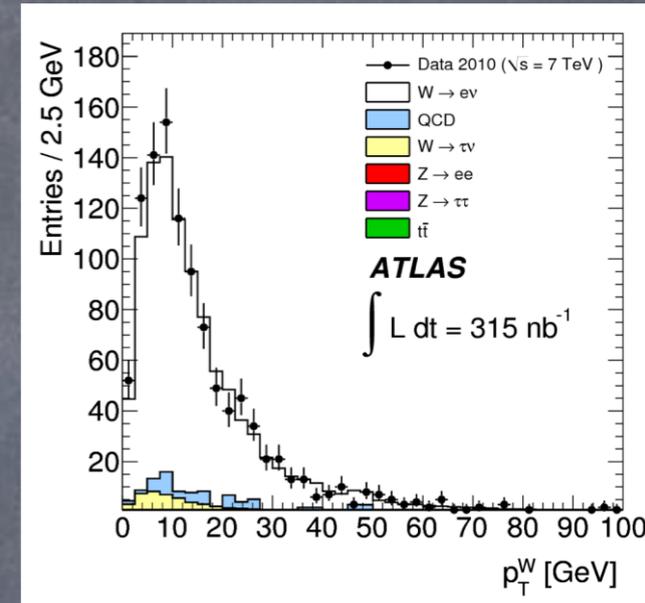


Abb. 8: transversale Impulsverteilung der Ws; aus [2]

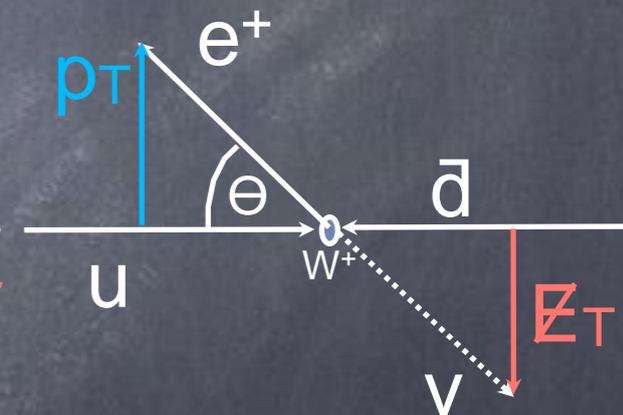


Abb. 9: Kinematik des W-Zerfalls

- “Masse des W-Bosons wird beim Zerfall in Impuls umgewandelt”  
 → Bestimmung transversaler Größen wie **transversaler Impuls  $p_T$**

$$m_W = 80.39 \pm 0.02 \text{ GeV}/c^2$$



# Teil 1 - Einführung

# Physik 8

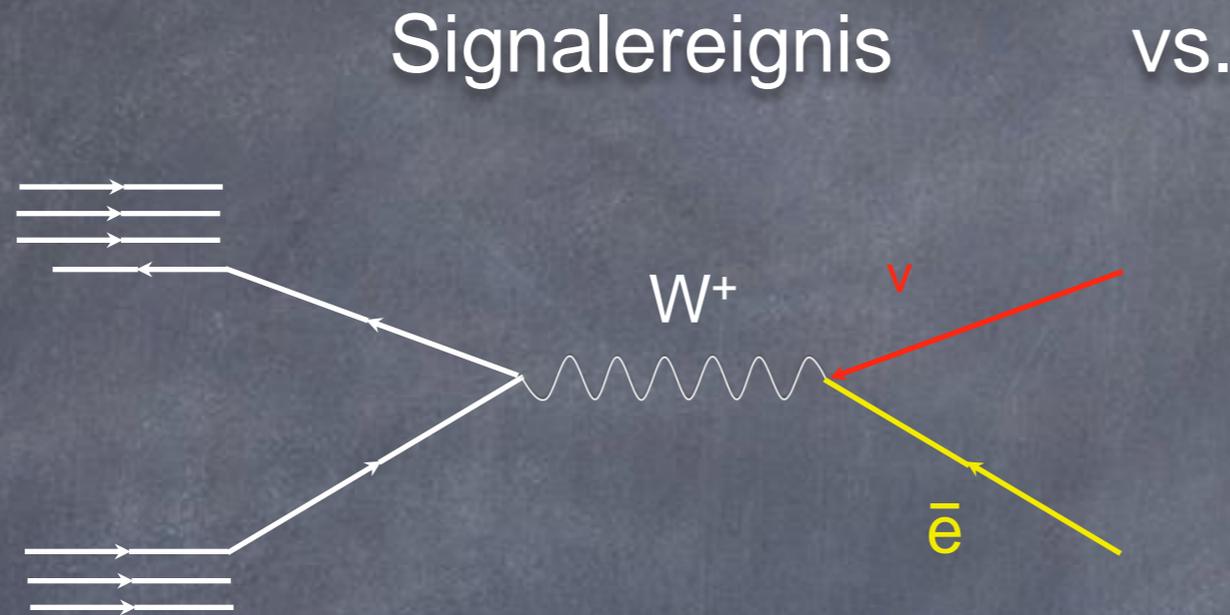


Abb. 10: Quark-Antiquark-Annihilation und Produktion eines W-Bosons

Ein Signalereignis kennzeichnet einen bestimmten physikalischen Prozess (Bsp.: die Erzeugung eines  $W^+$ -Teilchens).

Ein Prozess, der zwar eine dem Signalereignis identische Signatur im Detektor hinterlässt, ursprünglich aber einem anderen physikalischen Prozess (Bsp.: Erzeugung eines Z-Teilchens, Antitauon oder eines b-Quark-Paares) zuzuordnen ist, wird als Untergrundereignis bezeichnet.

## Untergrundereignisse

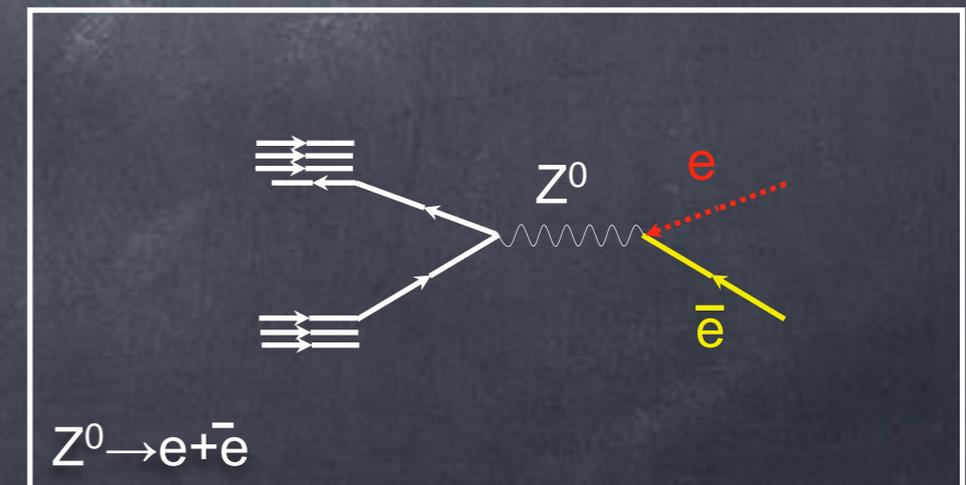
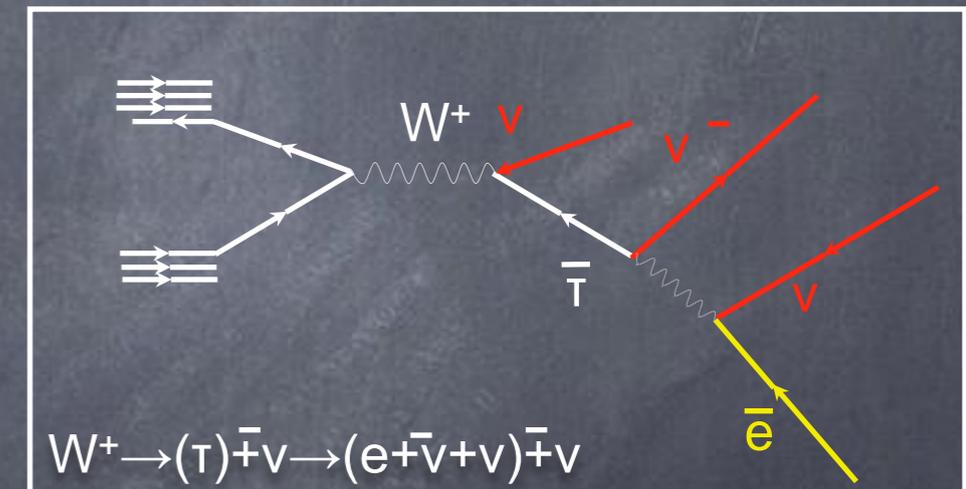
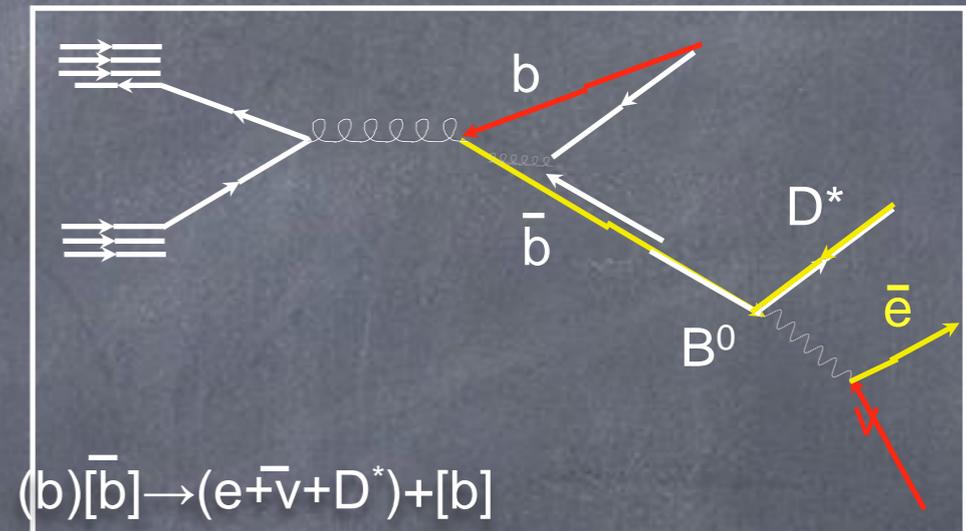


Abb. 11: Untergrundereignisse (W-Bosonen)

# Teil 1 - Einführung

# Physik 8

## Eigenschaften der Ereignisse mit zerfallenen W-Bosonen

- genau ein hochenergetisches, elektrisch geladenes Lepton [entweder Myon (bzw. Antimyon) oder Elektron (bzw. Positron)] mit  $p_T > 20 \text{ GeV}/c$
- fehlender transversaler Impuls als Zeichen für das nicht-detektierbare Neutrino mit  $E_{T,miss} > 25 \text{ GeV}$
- elektrisch geladenes Lepton muss isoliert von Jet sein

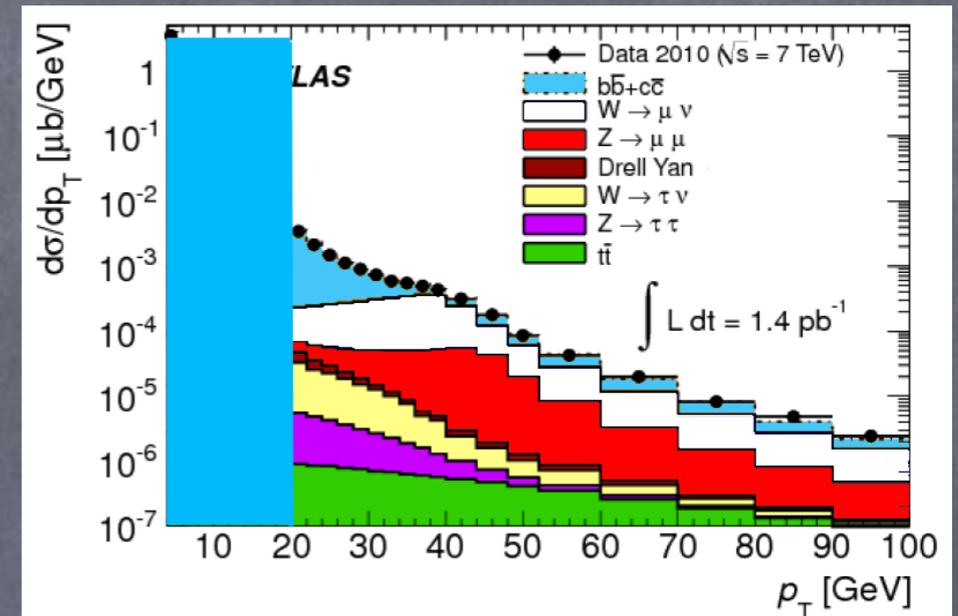


Abb. 12: Wirkungsquerschnitt von Myonen in Abhängigkeit des transversalen Impuls; aus [1]

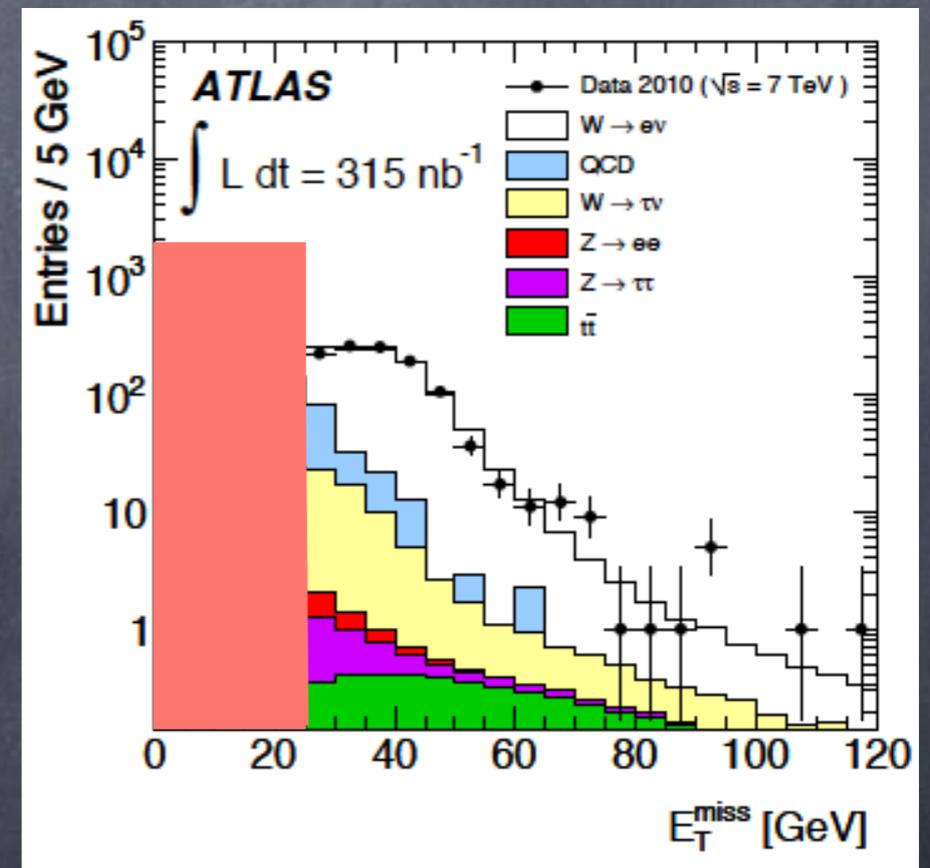


Abb. 13: Verteilung der  $E_{T,miss}$  aus Ereignissen mit hochenergetischen Elektronen; aus [2]

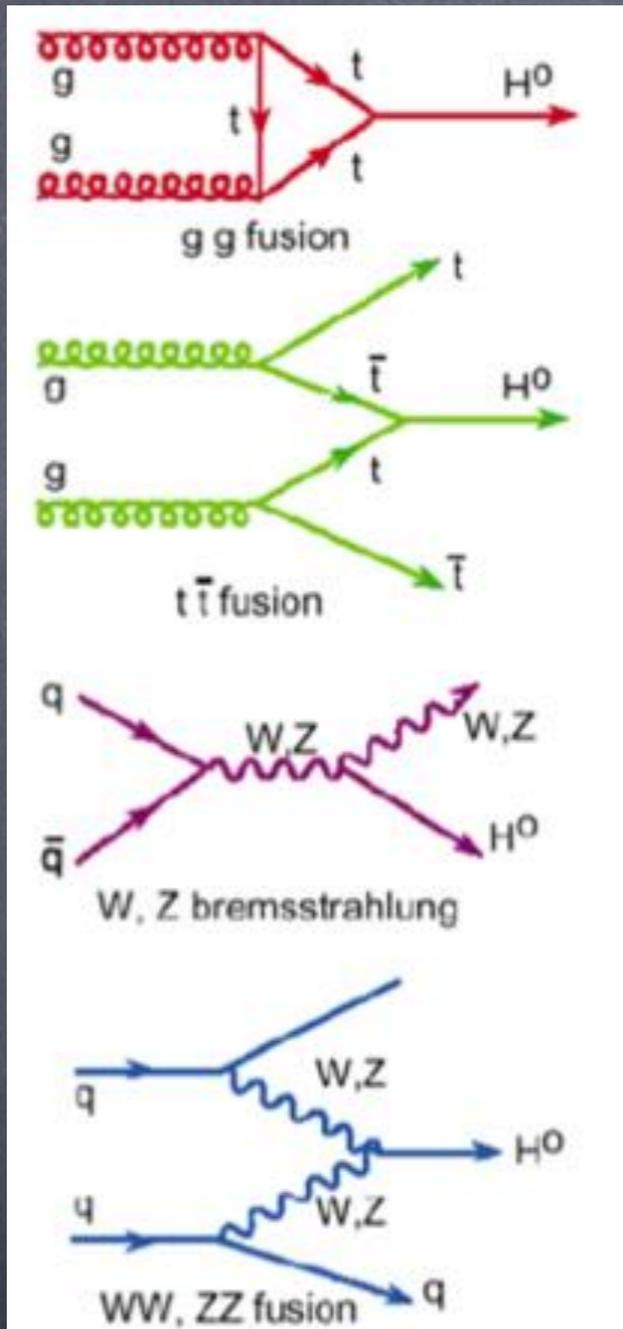


Abb. 14: Feynman-Diagramme zur Erzeugung eines Higgs-Boson

## Produktion - H-Boson

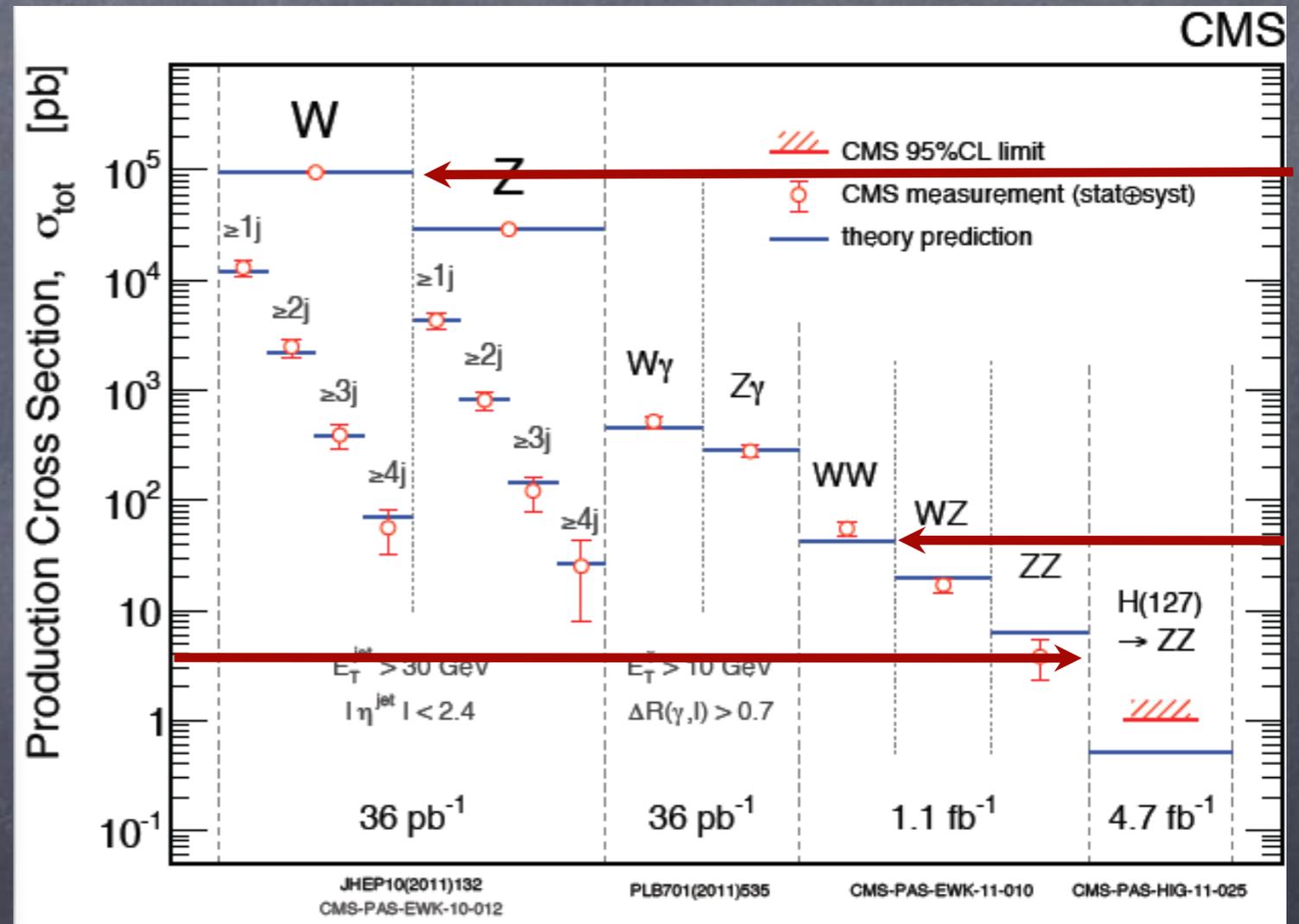


Abb. 15: Wirkungsquerschnitt für die "interessanten" Prozesse der Teilchenproduktionen bei hohen Schwerpunktsenergien, aus [4]



## Zerfall - H-Boson

H-Boson

Lebensdauer:  $\approx 10^{-25}\text{s}$

Masse: ???

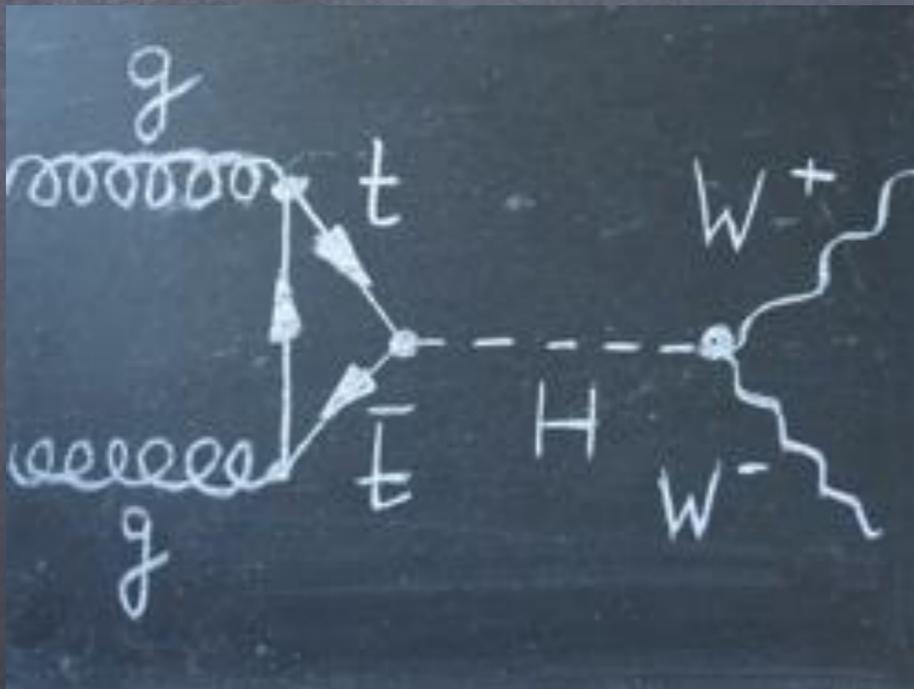


Abb. 16: Feynman-Diagramm zum Zerfall des Higgs-Boson in zwei W-Bosonen

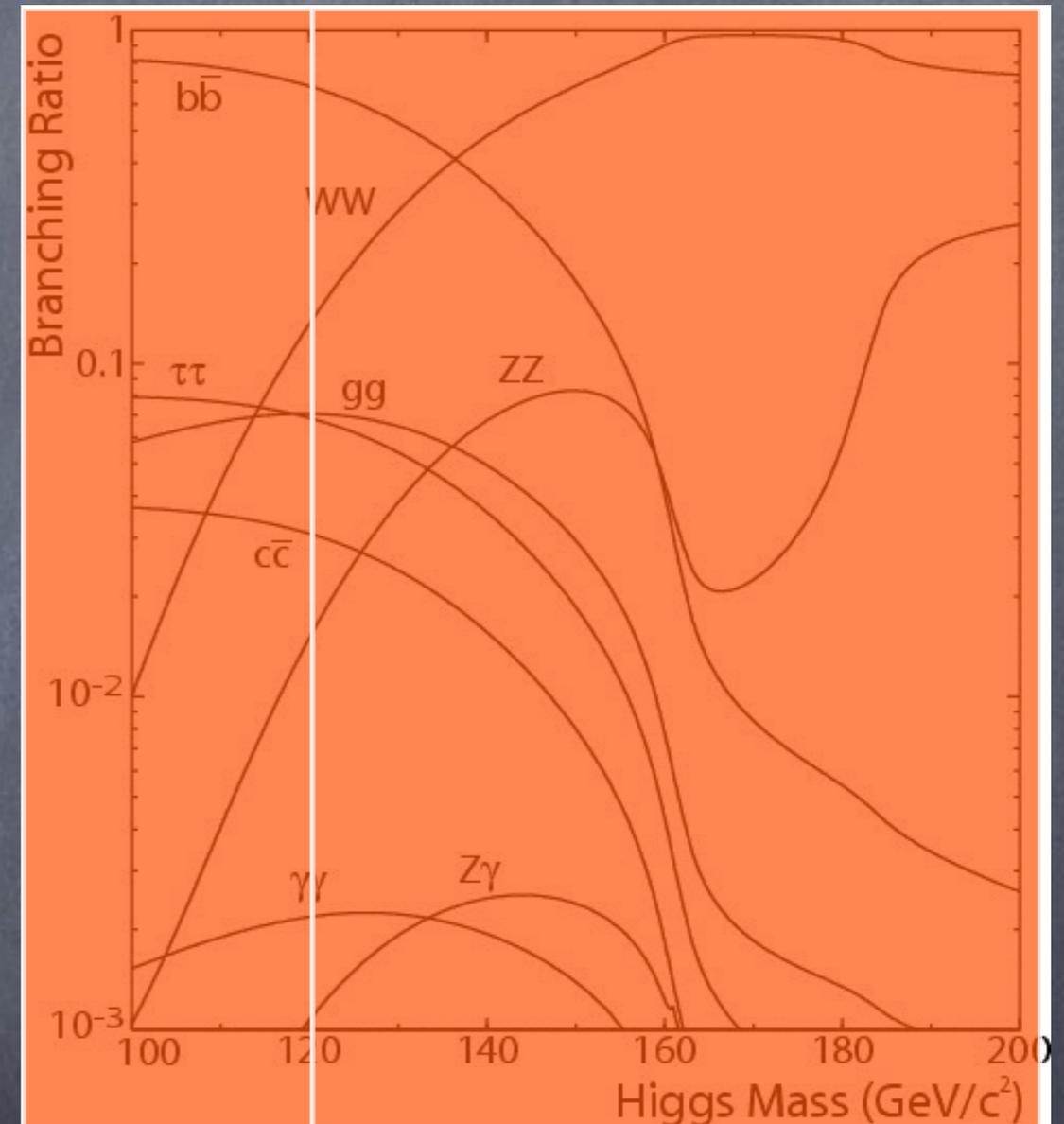


Abb. 17: Verzweigungsverhältnis des Higgs-Zerfalls in Abhängigkeit der Higgs-Masse



## Die Problematik bei der Suche $H \rightarrow WW$

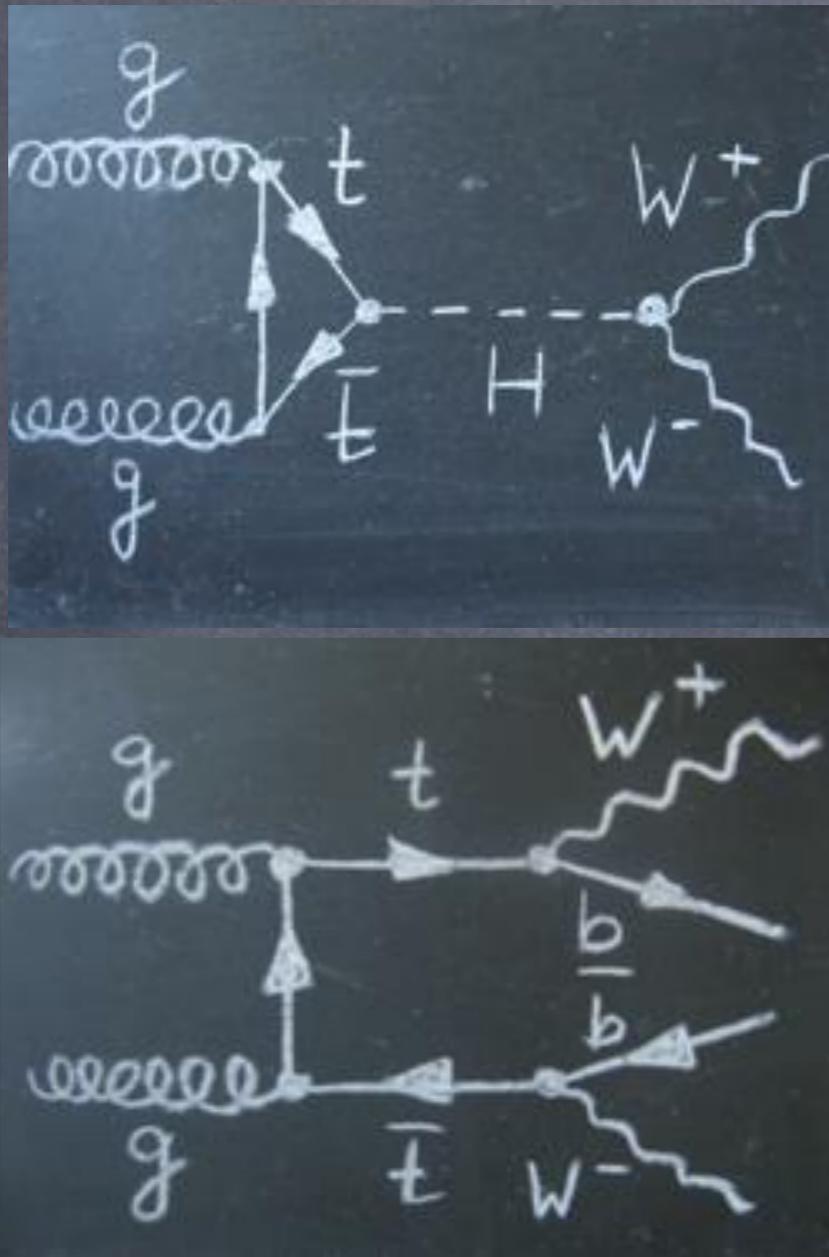


Abb. 18: Signal (oben) vs Untergrund (unten)

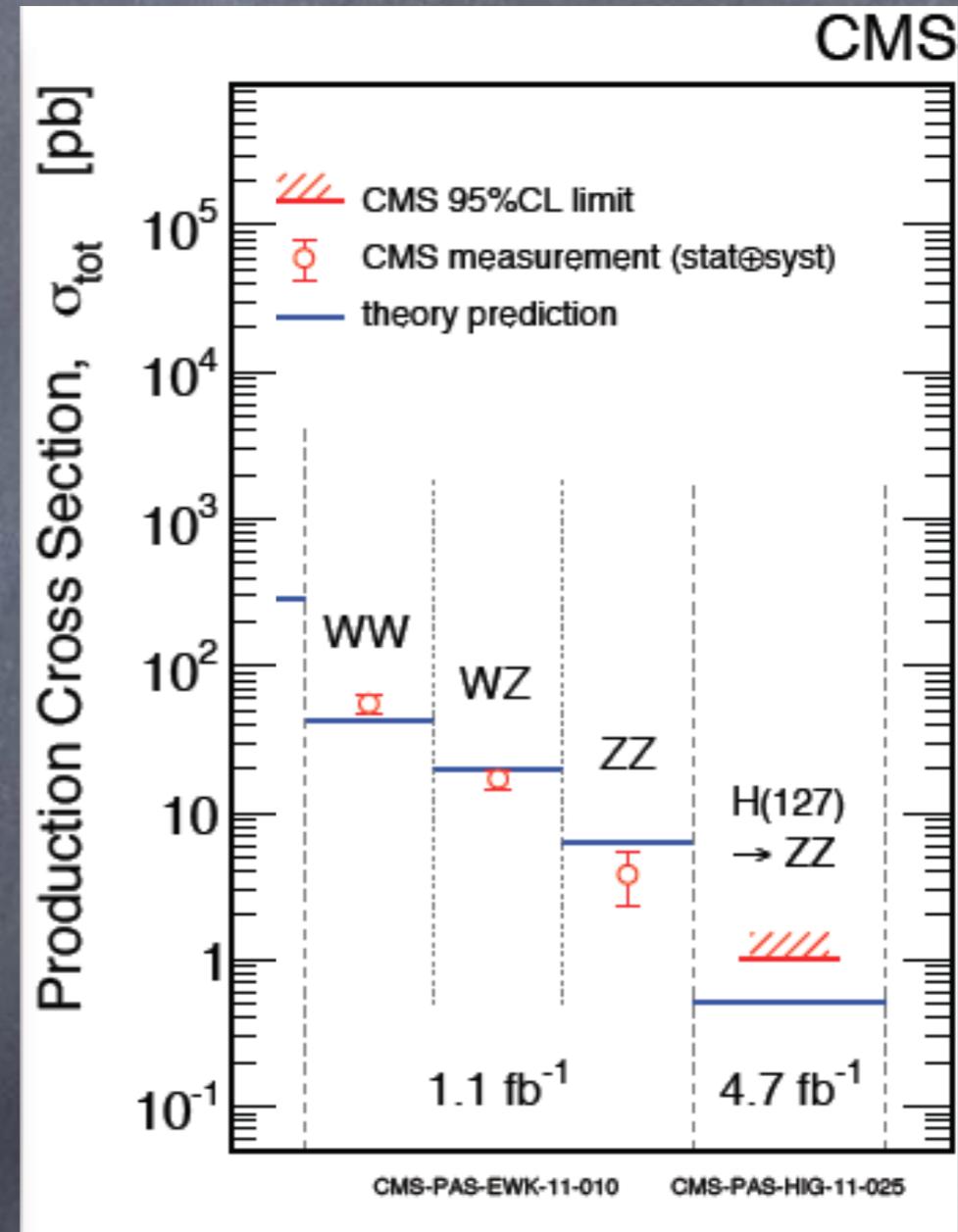
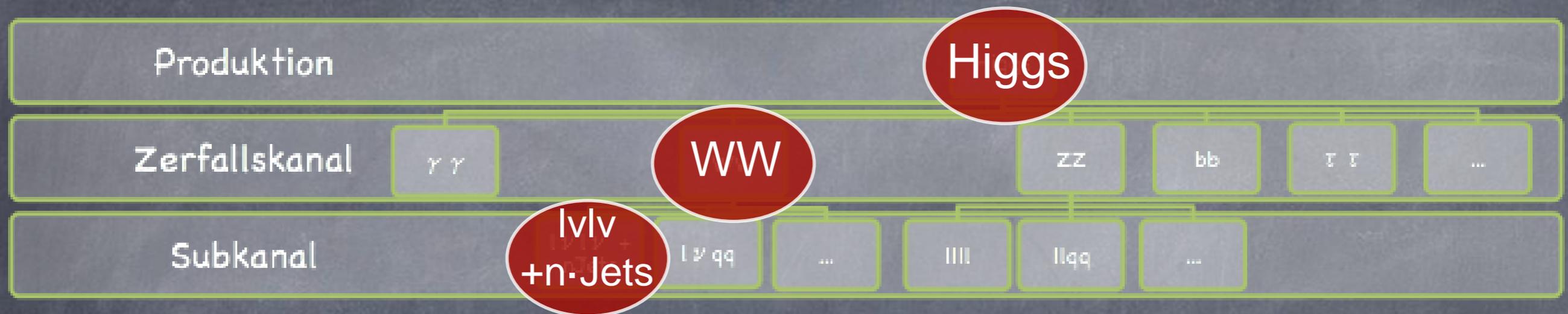


Abb. 19: Wirkungsquerschnitte der WW- und Higgs-Produktion





## Eigenschaften der Ereignisse mit zerfallenen H-Bosonen im Zerfallskanal $H \rightarrow WW \rightarrow l\nu l\nu + n \cdot \text{Jets}$ ( $n=0,1$ )

- genau zwei hochenergetische, elektrisch unterschiedlich geladene Leptonen [entweder Myon und (oder) Antimyon oder (und) Positron und (oder) Elektron] mit  $p_{T,\text{lead}} > 25 \text{ GeV}/c$  und  $p_{T,\text{sub}} > 15 \text{ GeV}/c$
- fehlender transversaler Impuls als Zeichen für das nicht-detektierbare Neutrino mit  $E_{T,\text{miss}} > 25 \text{ GeV}$  (wenn Leptonen aus unterschiedlichen Familien, also bspw. Elektron und Antimyon) bzw.  $E_{T,\text{miss}} > 50 \text{ GeV}$  (wenn Leptonen aus gleicher Familie, Bsp.: Elektron und Positron)
- Leptonen isoliert von Jets + 0 oder 1 Jet im Ereignis



Frage: Wann kann man sagen, dass man das Higgs gefunden hat?

- im Einzelnen sind sehr technische und komplizierte statistische Werkzeuge auszuwerten
- Abschätzung ist gut möglich:
- Bestimme Anzahl der Datenereignisse  $N$ , Anzahl der erwarteten Untergrundereignisse  $B$ , die statistische Fluktuation des Untergrundes  $\sqrt{B}$  und berechne die statistische Signifikanz:  $S/\sqrt{B} = (N-B)/\sqrt{B}$
- Ergebnis: stat. Signifikanz in Vielfachen von  $\sigma$
- $3\sigma$  - Beweis,  $5\sigma$  - Entdeckung,  $5\sigma$  und unabhängige Bestätigung in zweitem Experiment - bestätigte Entdeckung
- $1\sigma$  (68%),  $2\sigma$  (95.5%),  $3\sigma$  (99.73%),  $4\sigma$  (99.993%),  $5\sigma$  (99.99994%)



- Strategien, Methoden, Werkzeuge für die Suche nach Teilchen ist sehr unterschiedlich
- Ereignisse mit einem W-Teilchen (hochenergetisches, elektr. geladenes Lepton mit  $p_T > 20 \text{ GeV}/c$  isoliert von Jets, Neutrino über  $E_{T,miss} > 25 \text{ GeV}$ )
- Suche nach dem Higgs geschieht in vielen Zerfallskanälen, u.a.  $H \rightarrow WW$
- Ereignisse mit zwei W-Teilchen (zwei elektrisch unters. geladenen Leptonen mit  $p_{T,lead} > 25 \text{ GeV}/c$  und  $p_{T,sub} > 15 \text{ GeV}/c$  isoliert von Jets, Neutrinos über  $E_{T,miss} > 25 \text{ GeV}$  bzw.  $E_{T,miss} > 50 \text{ GeV}$  (wenn Leptonen aus einer Familie))
- diese stammen in 10-20% der Fälle vom Zerfall des Higgs-Teilchen (insofern es existiert)
- statistische Untersuchung mittels Öffnungswinkel der elektr. geladenen Leptonen in der transversalen Ebene ist notwendig



# Vorschau

- Einführung
- Übungen
- Messung
- Diskussion



### Was wird benötigt?

- \* Computerzugang:
- \* Benutzername: teachxy (x,y steht für Ziffer von 0-9, welche den Laptop charakterisiert)
- \* Passwort: CERNteach.xy
- \* Event Display 'MINERVA' (Anwendung 'atlantis' vom Desktop starten)



### Was wird benötigt?

- \* Webseite: <http://www.cern.ch/kjende/de/wpath.htm>
- \* Ereignispakete (2A.zip ... 2T.zip) befinden sich im Ordner 'events' des Event Display Programms
- \* Strichliste, Begleimaterialien
- \* <http://kjende.web.cern.ch/kjende/results/WpathAnalysis.php?institutID=115> (zum Eintragen der Messergebnisse)



### Vorbereitung der Eventanalyse

- \*  $1.7 \cdot 10^{15}$  Kollisionen wurden bis heute von ATLAS aufgezeichnet (Stand: 28.11.2012)
- \* Zu analysierende Daten wurden vorausgewählt, denn
- \* Zeit ist knapp
- \* Programmierfähigkeiten sind gering



### Vorbereitung der Eventanalyse

- \*Konzentration auf EINE Teilchensorte: W-Teilchen
- \*Das W-Teilchen kann leptonisch (d.h. in Elektronen, Positronen, Myonen, Antimyonen, Tauonen und Antitauonen) oder hadronisch (in Quark-Antiquark-Paare) zerfallen - Konzentration auf leptonischen Zerfall und Ausklammern des problematischen Zerfalls in Tauonen



### Ablauf

- 1.Event Display Funktionen
- 2.Teilchen identifizieren mit absch. Übung
- 3.Ereignisse klassifizieren mit absch. Übung



# Vorschau

- Einführung
- Übungen
- Messung
- Diskussion



### Aufgaben

1. Miss das Verhältnis ( $R_{\pm}$ ) der Anzahl von Ereignissen mit elektrisch positiv zu elektrisch negativ geladenen  $W$ -Teilchen.
2. Was bedeutet der unter 1. ermittelte Messwert für den inneren Aufbau des Protons? Begründe!
3. Miss in allen zu findenden Ereignissen mit zwei  $W$ -Teilchen den Winkel zwischen den beiden Leptonen in der transversalen Ebene.
4. Triff anhand der Winkelverteilung und der theoretischen Vorhersagen Aussagen über das Signal zu Untergrund - Verhältnis in bestimmten Winkelbereichen.



# Teil 3 - Messung

## Vorbereitung auf die Messung 1

**Analysis on an ATLAS data sample**

Group D: 0151-0200

Events		Tally Marks		Number of Events
Signal 1	$W \rightarrow e + \nu$	*		
		-		
	$W \rightarrow \mu + \nu$	*		
		-		
Signal 2	$WW \rightarrow l\nu + l\nu$	Event number	$\Delta \theta_{ll}$	
Background				

Comments/Event number(s) of strange or unclear events:

Wichtiger Buchstabe; steht für das Datenpaket, welches analysiert werden soll

Mit Strichen auszufüllen

Ereignisnummer und Winkel eintragen

Mit Strichen auszufüllen

Letzte Spalte zum Zusammenzählen

Abb. 21: In der Messung verwendete Strichliste



Nach der Messung sollen die Messwerte aller  
Gruppen kombiniert werden.  
Dazu tragen Sie bitte Ihre Messwerte in der  
folgenden online-Tabelle ein:

\* <http://kjende.web.cern.ch/kjende/results/WpathAnalysis.php?institutlD=115>





Viel Spaß bei Ihrer ersten LHC-Datenanalyse

Fragen sind dringend  
erwünscht und notwendig  
zur erfolgreichen  
Bewältigung der Aufgaben



# Vorschau

- Einführung
- Übungen
- Messung
- Diskussion



### Aufgaben

1. Miss das Verhältnis ( $R_{\pm}$ ) der Anzahl von Ereignissen mit elektrisch positiv zu elektrisch negativ geladenen W-Teilchen.
2. Was bedeutet der Messwert von 1. für den inneren Aufbau des Protons? Begründe!

<http://kjende.web.cern.ch/kjende/results/WpathAnalysis.php?institutID=115>



### Aufgaben

3. Miss in allen zu findenden Ereignissen mit zwei W-Teilchen den Winkel zwischen den beiden Leptonen in der transversalen Ebene.
4. Triff anhand der Winkelverteilung und der theoretischen Vorhersagen Aussagen über das Signal zu Untergrund - Verhältnis in bestimmten Winkelbereichen.

<http://kjende.web.cern.ch/kjende/results/results.php?institutID=115>



# Teil 5 - Anhang

## Literatur

- [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  $W \rightarrow l\nu$  and  $Z/\gamma^* \rightarrow ll$  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)



# Teil 5 - Anhang

## Webseiten

- [www1] <http://www.cern.ch/kjende/de/wpath.htm> - Webseite zur ATLAS W-Messung bei Masterclasses
- [www2] [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
- [www3] <http://www.cern.ch/kjende/de/downloads/minerva2012.zip> - Link zum Herunterladen des Event Display Programms MINERVA
- [www4] <http://www.atlas.ch> - offizielle Webseite des ATLAS-Experimentes mit sehr guter Multimedia-Abteilung
- [www5] <http://www.physicsmasterclasses.org> - Informationen zu den Internationalen Masterclasses
- [www6] <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.

