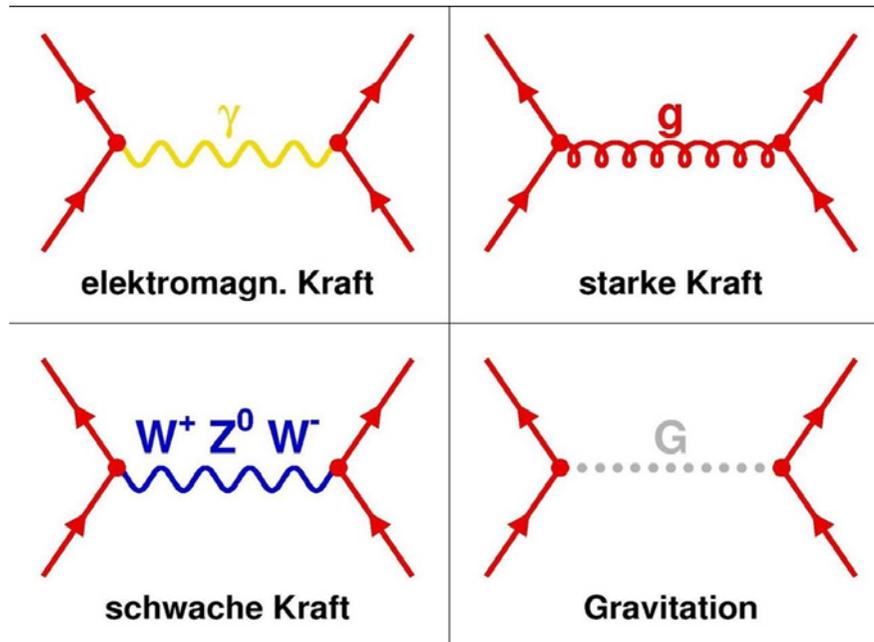


Ursprung der Masse: Higgs-Teilchen



Standard-Modell:

- perfekte Symmetrie ohne Masse
- Kräfte durch Symmetrien beschreibbar

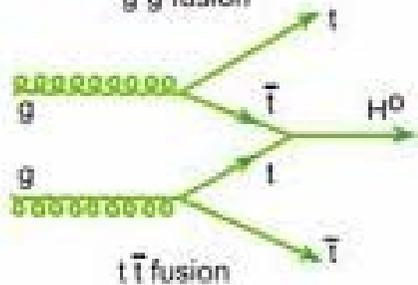
Forderung: **Austauschteilchen müssen masselos sein**

Erfüllt für **Photon** und **Gluon**,
Aber nicht für **W- und Z-Bosonen**

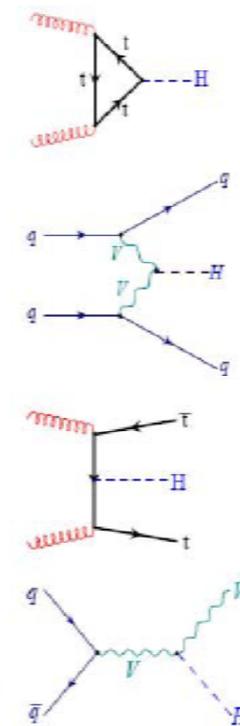
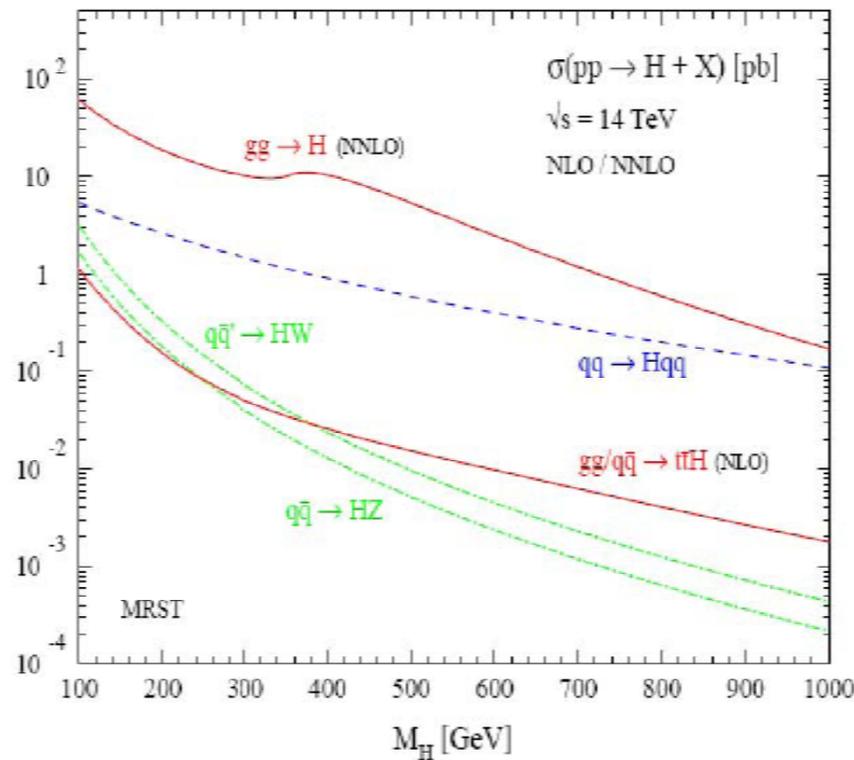
Konsequenz: → Symmetrie muss gebrochen sein ←

- Symmetriebrechung erzeugt neues, massives Feld: **Higgs-Feld**
- Konsequenz der Symmetrie-Brechung: **W- und Z-Bosonen** werden massiv
- Erzeugung von Massen durch Kopplung an das Higgs-Feld
- Teil des Standard-Modelles, noch nicht entdeckt

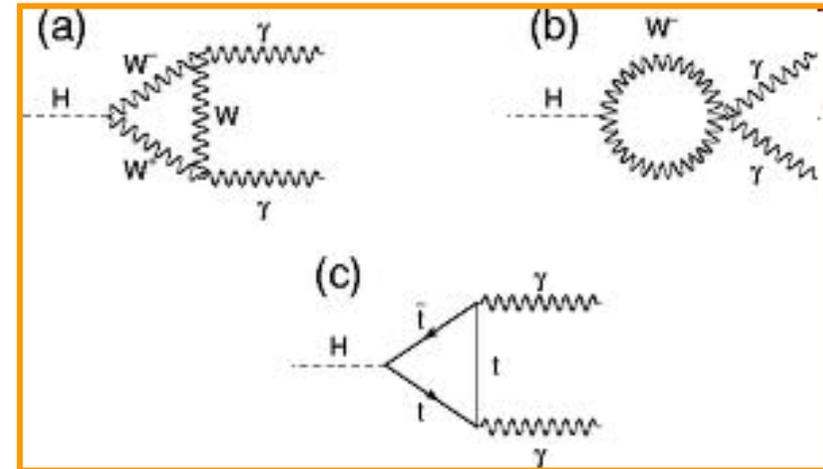
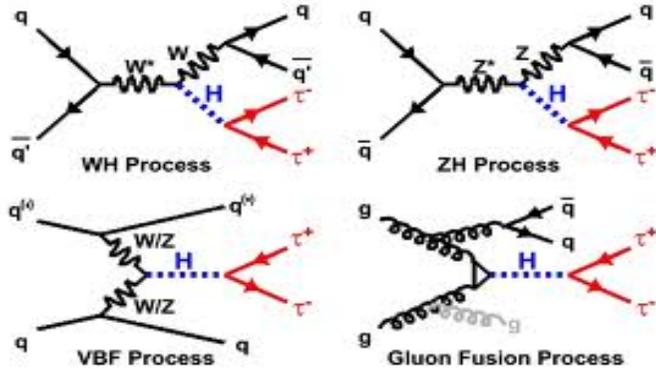
Higgs-Produktion



Das Higgs koppelt an die **Masse**:
Produktion mit schweren Teilchen
dominant → **sehr seltene Prozesse**

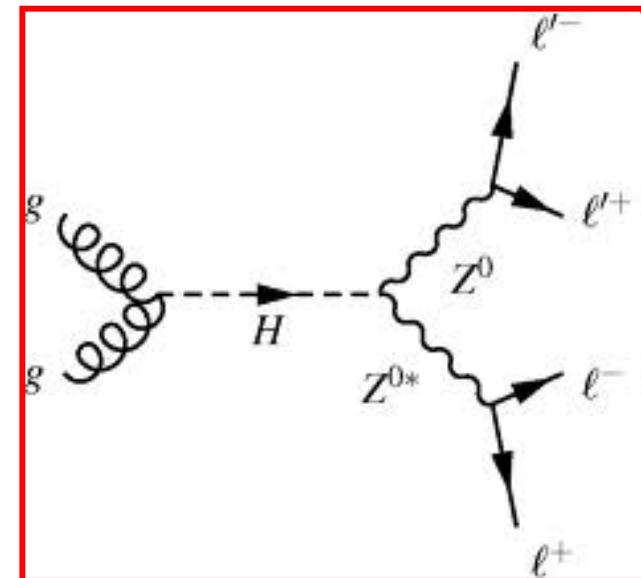
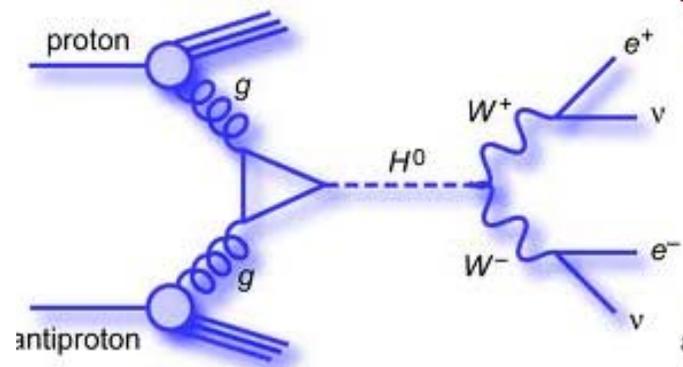


Higgs Zerfälle

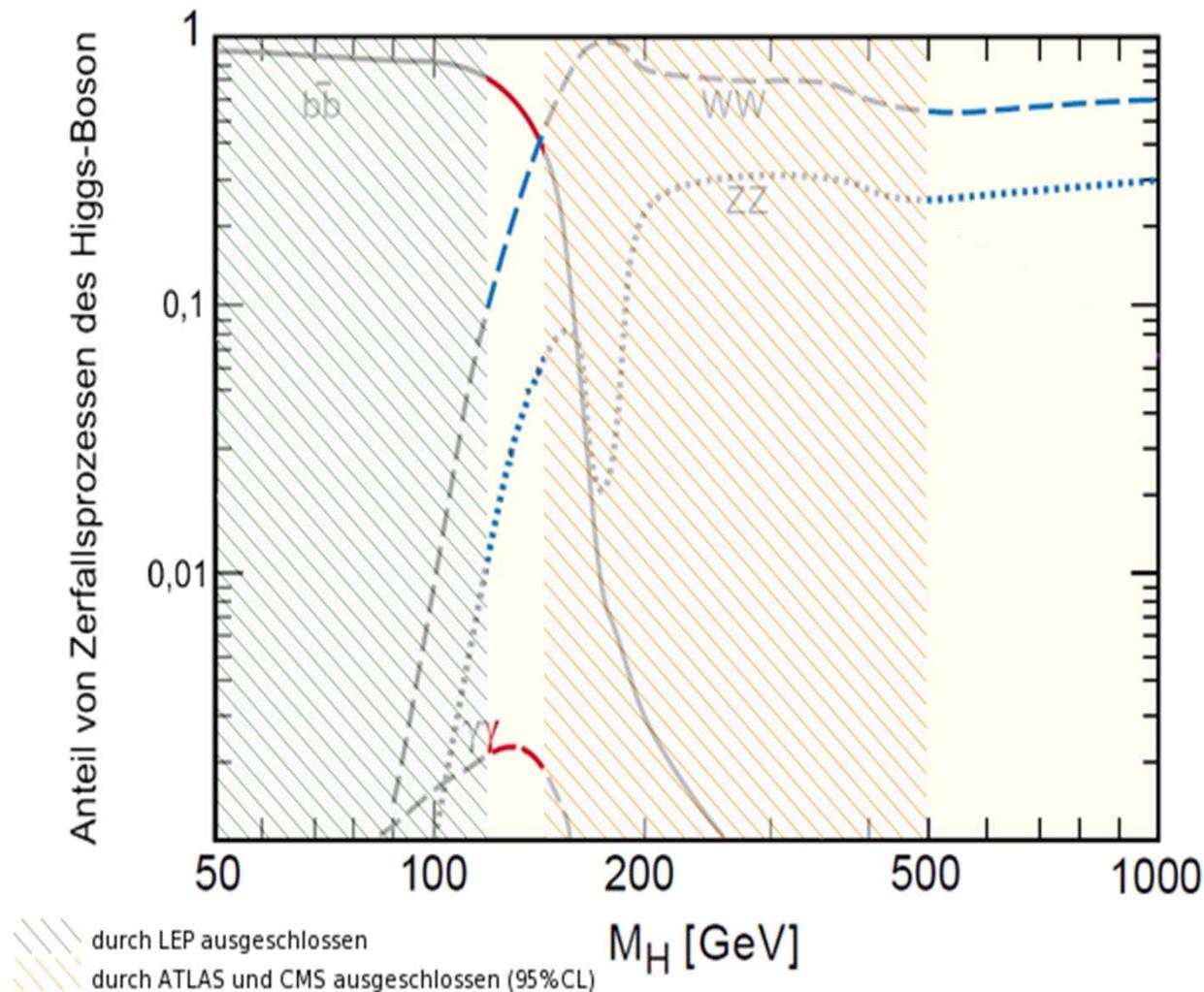


Viele Zerfallsarten, Kopplung an schwere Teilchen dominant (**W, Z, top, tau**)

- **sehr seltene Prozesse**
- **schwer vom Untergrund zu trennen**



Bereiche möglicher Higgs-Kandidaten



Bereiche der Higgsmassen, die noch nicht durch Experimente "ausgeschlossen" wurden,

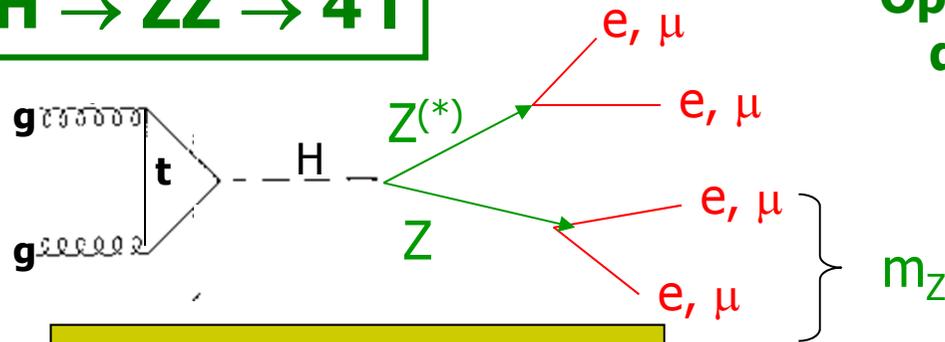
SM bevorzugt ein leichtes Higgs:

→ **Schwierigster Bereich!**

→ W und Z Bosonen wichtig für die Messung

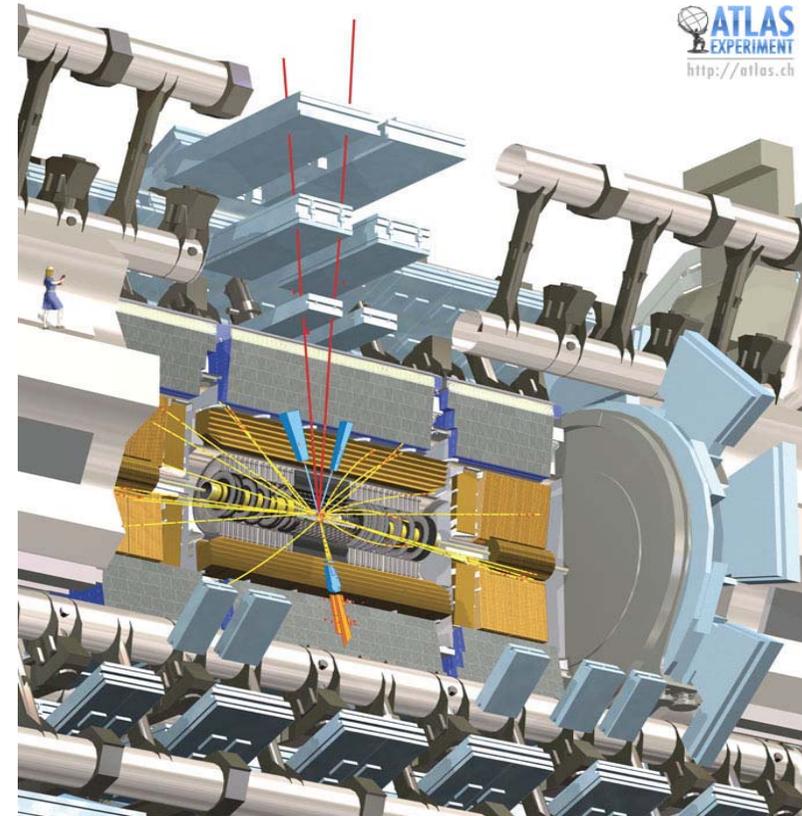
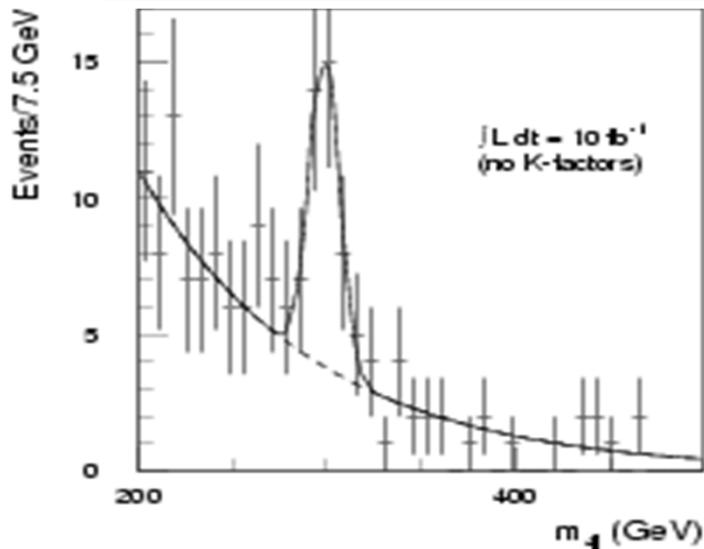
Vermessung des Higgs: Theorie

$$H \rightarrow ZZ \rightarrow 4l$$



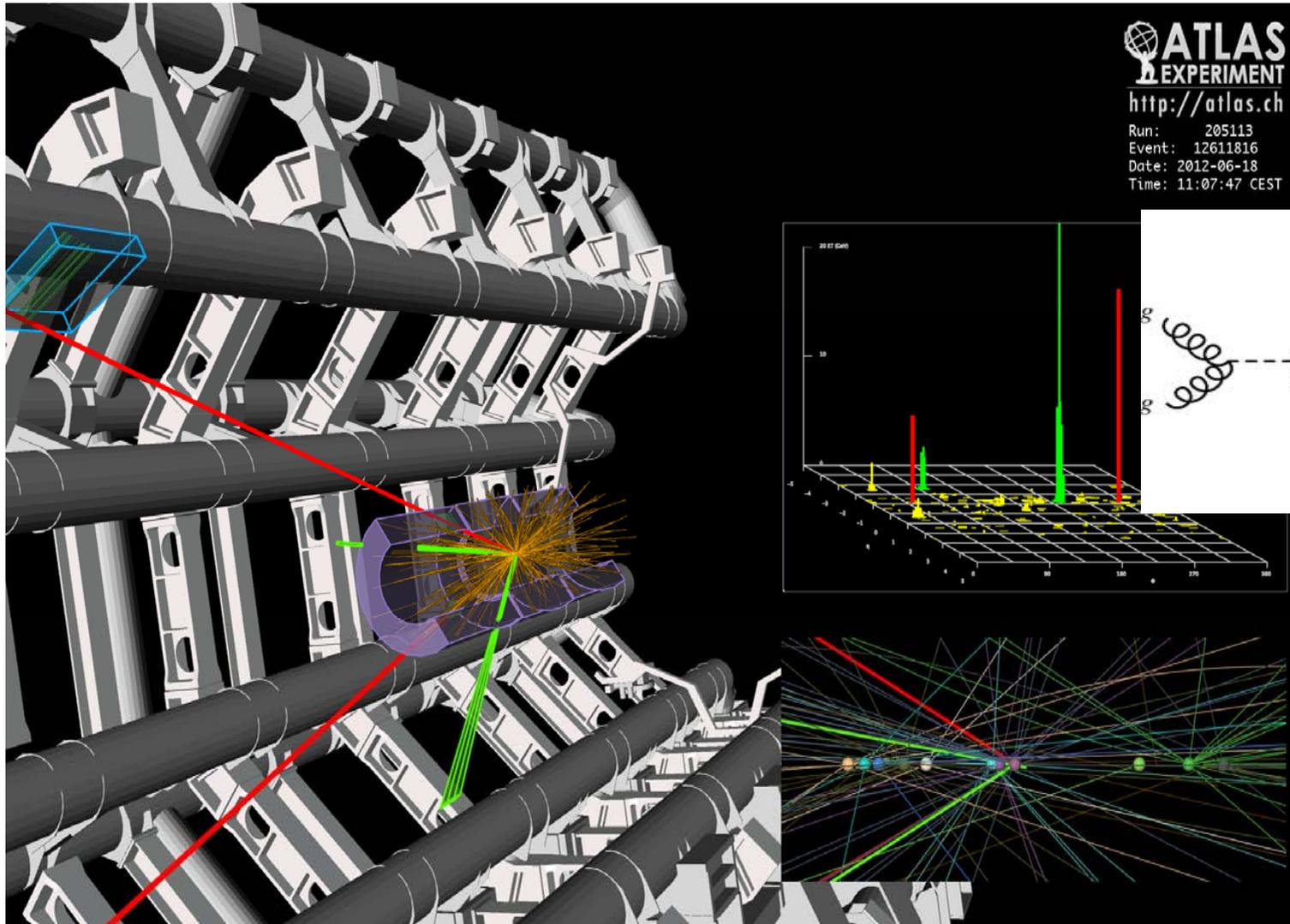
Optimaler Kanal zur Entdeckung des Higgs-Teilchens bei LHC

Zu erwartendes Higgs-Signal nach 1 Jahr Messen

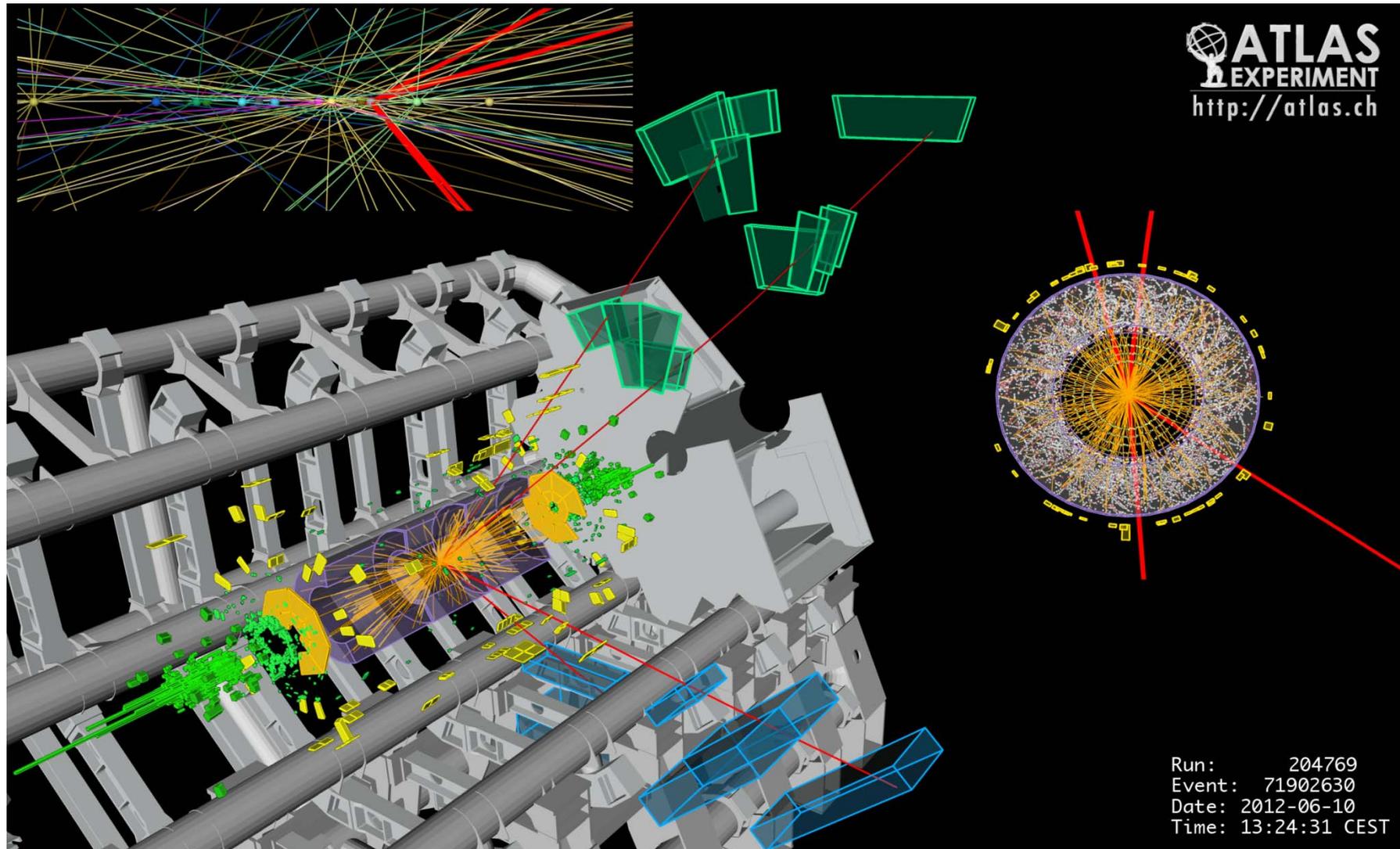


Simulation eines $H \rightarrow \mu\mu ee$ Ereignisses

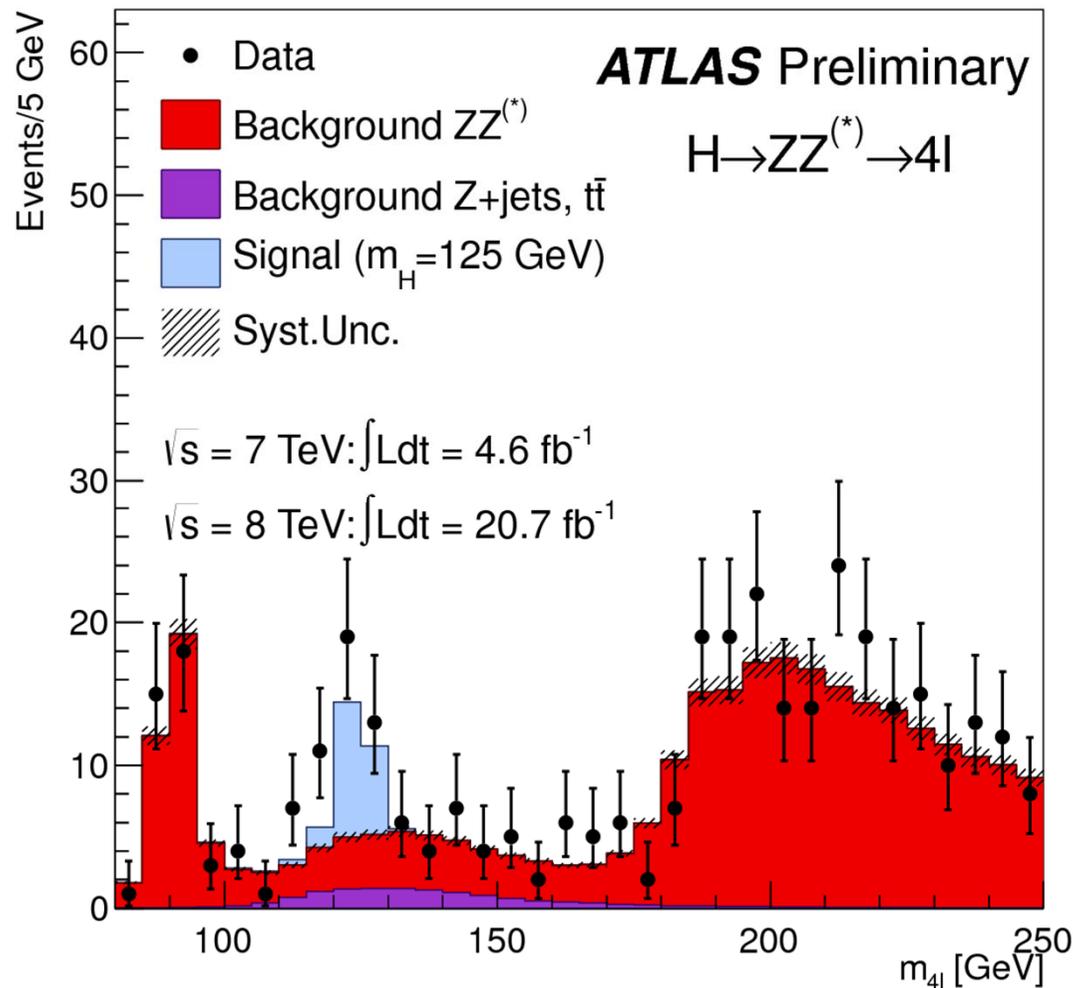
Higgs-Zerfall in zwei Z und 4 Leptonen



Zerfall in Higgs nach 4 Muon

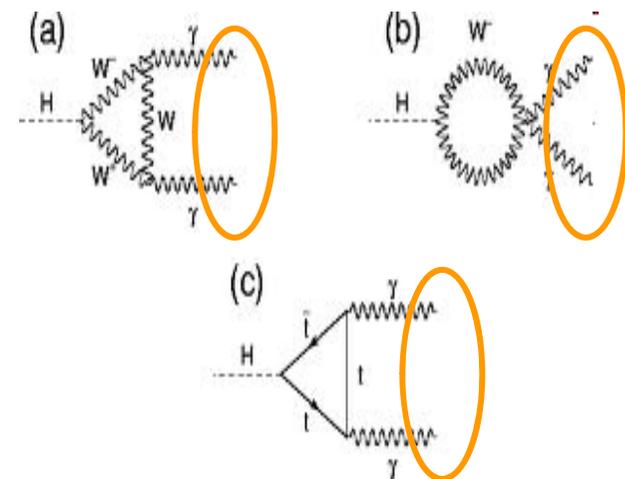
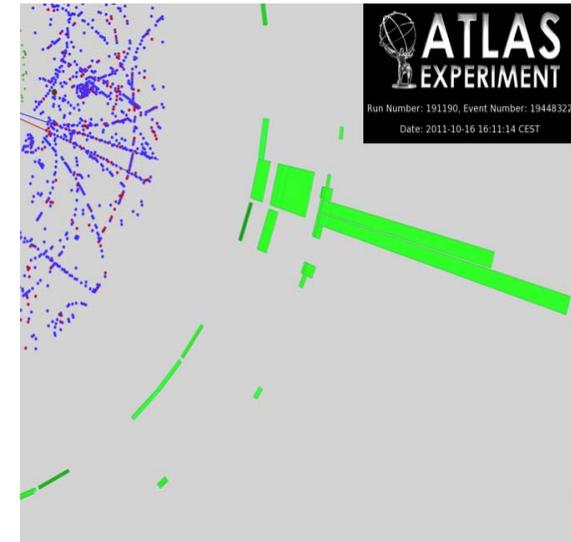
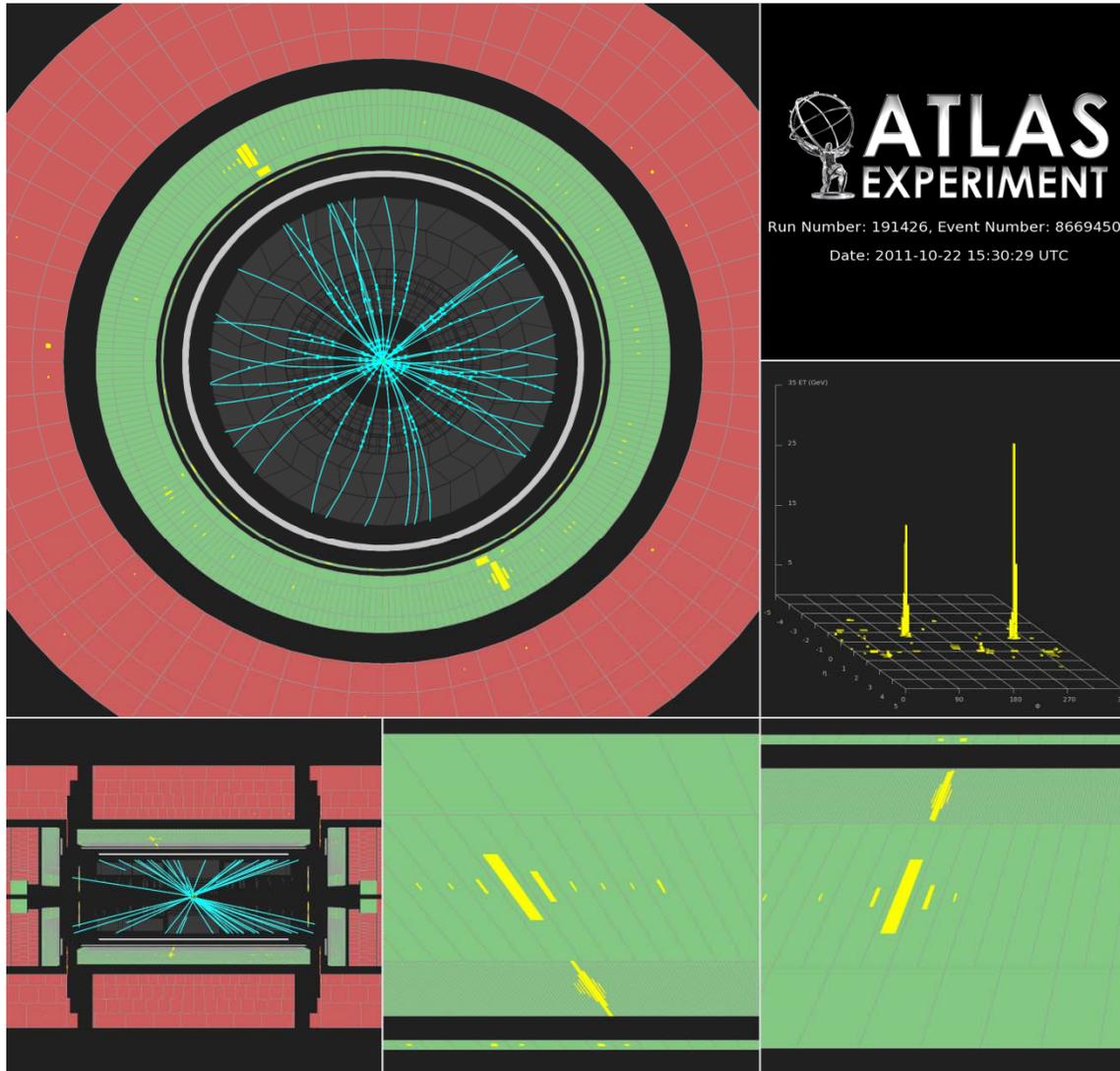


Resultate des 4 Lepton Kanales



- Messung der invarianten Masse von zwei Z-Bosonen im leptonischen Zerfall
- Anhäufung sichtbar bei einer Masse von 125.6 GeV
- Klare Trennung von Untergrundprozessen
- Zerfall des Higgs nach ca. 10^{-22} s
- Wahrscheinlichkeit für diesen Kanal: 0.013%
- Sehr klare Signatur:
 - **Größtes Entdeckungspotential**

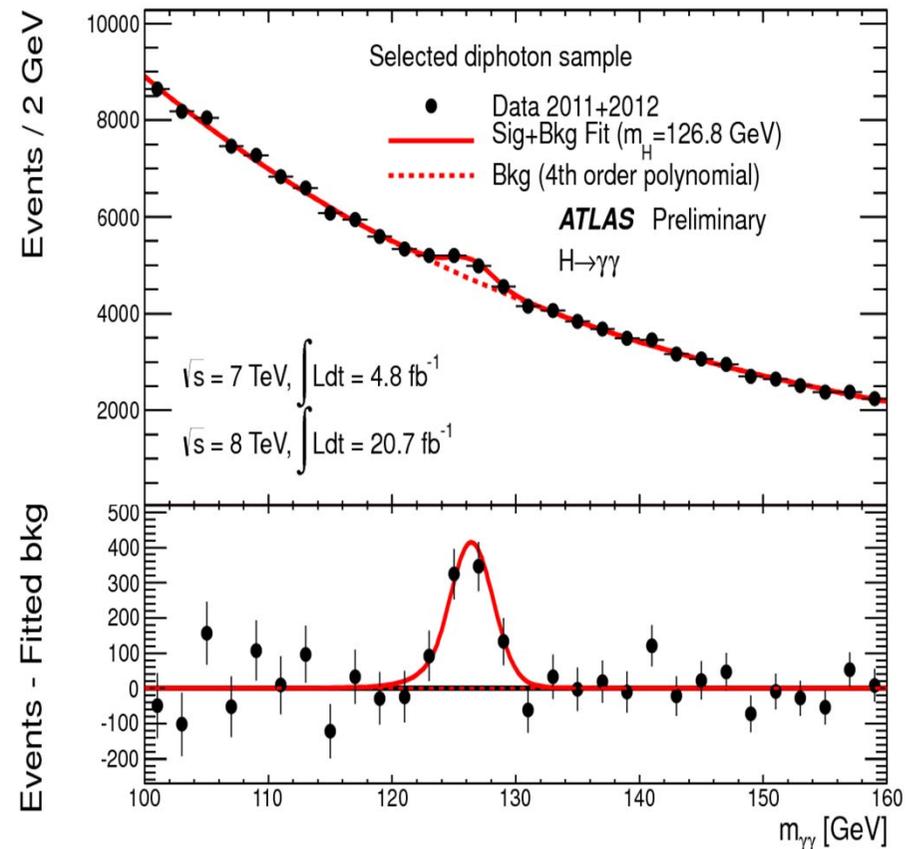
Higgs Zerfall in zwei Photonen



Resultat der Suche nach $H \rightarrow \gamma\gamma$



- Messung der invarianten Masse von zwei Photonen
- Anhäufung sichtbar bei einer Masse von 125.6 GeV
- Kompatibel mit den Resultaten anderer Kanäle
- Schwierig zu messender Kanal, aber sehr starker Hinweis
- Zerfallswahrscheinlichkeit: 0.2 %

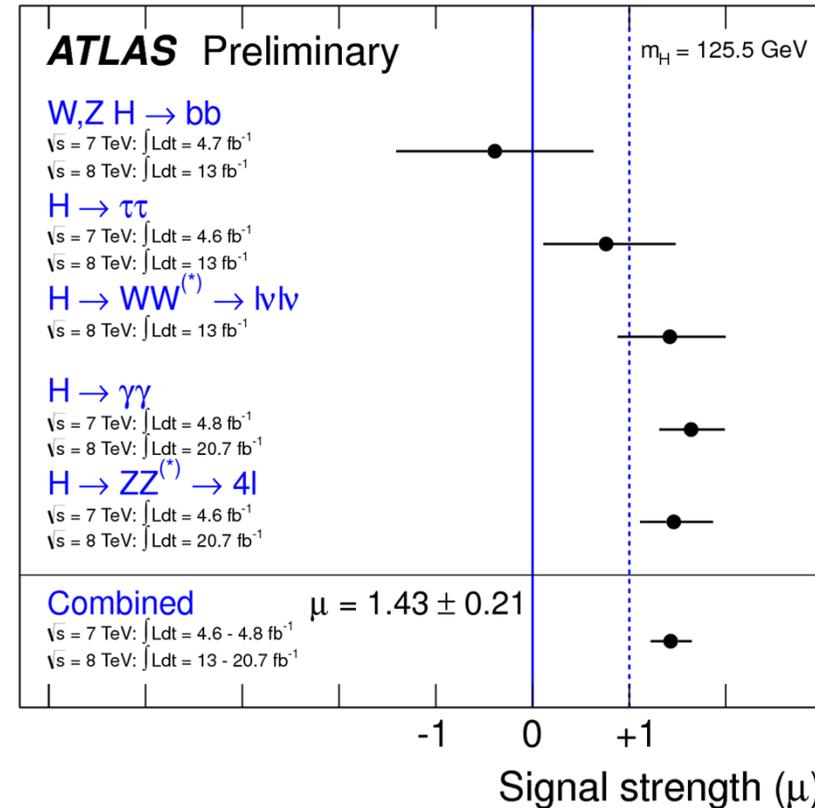
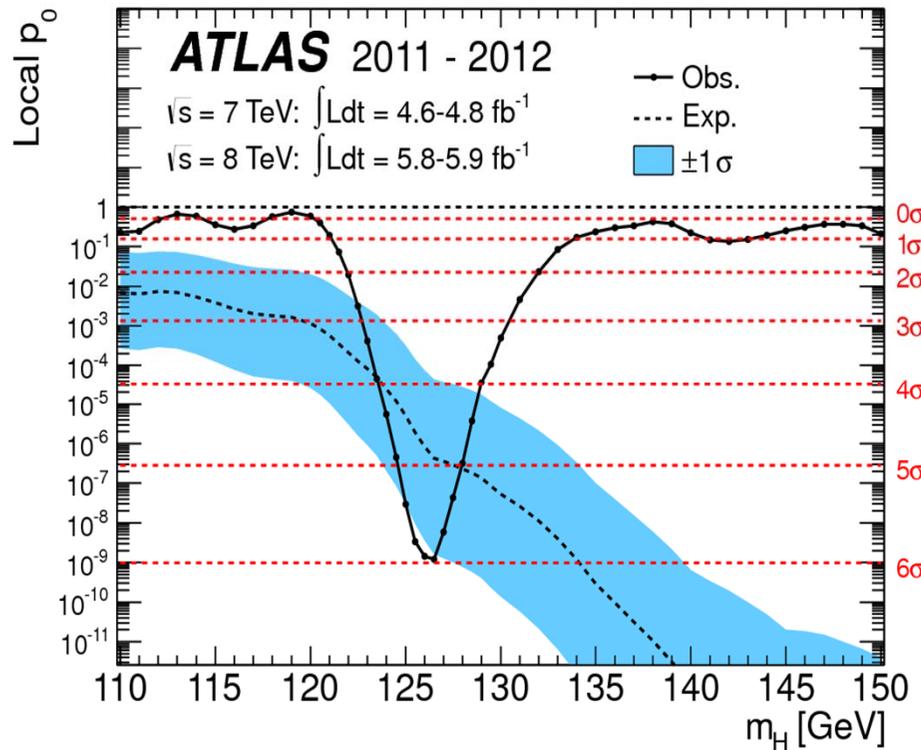


Higgs-Suche: Zwischenstand



- Überschuss von Ereignissen in verschiedenen Kanälen und beiden Experimenten (ATLAS und CMS) bei **$M \sim 125.6 \text{ GeV}$**
 - Klare Abweichung der Erwartung reiner Untergrundprozesse
 - ❖ Überschuss von ~ 100 Ereignissen im $Z \rightarrow \gamma\gamma$ Kanal
 - ❖ Überschuss von ~ 10 Ereignissen im $Z \rightarrow ZZ$ Kanal
- Quantisierung des Überschusses:
 - **"p-Wert"** : Mass für die Wahrscheinlichkeit, dass die Beobachtung nur der Hypothese "Untergrund" entspricht
 - **Definition einer Entdeckung: $p = 2.9 \cdot 10^{-7}$**
(entspricht 5 Gauss'schen Standardabweichungen σ)
 - Signifikanz der Messungen (Kombination aller Kanäle)
 - ❖ **ATLAS: 5.9σ**
 - ❖ **CMS: 5.0σ**

Die Wichtigste Entdeckung der letzten 50 Jahre



Es bleibt noch viel zu tun

Ist das wirklich das Higgs, d.h. hat es die Standard Modell vorhergesagten Eigenschaften?

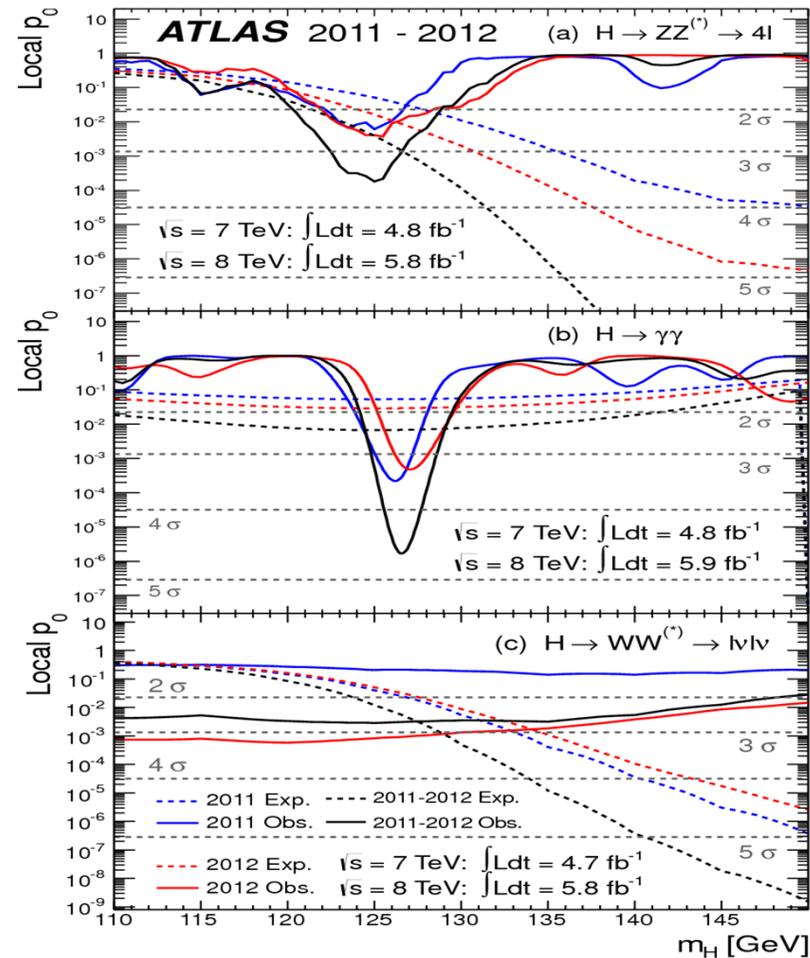
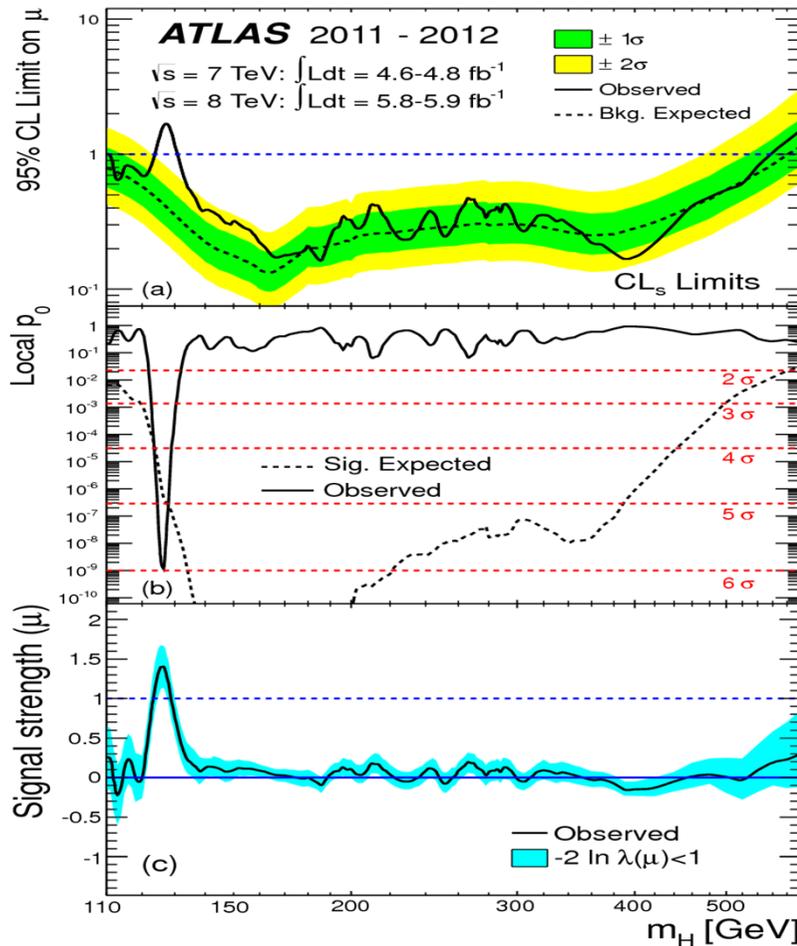
Gibt es noch mehr Higgs-Bosonen → Hinweise auf neue Physik?

Eigenschaften des neuen "Bosons"



- Hat das neue Teilchen die Eigenschaften des vom Standard-Modell vorhergesagten Higgs-Bosons?
- Higgs-Masse ist ein freier Parameter
 - durch die Messung werden die Vorhersagen der Theorie festgelegt
 - gemessener Wert liegt im favorisierten Bereich der Theorie
- Mass dafür ist die **Signalstärke μ** :
 - Beobachtete Häufigkeit normiert auf Erwartung der Theorie
 - Messungen vertäglich mit der Standard-Modell Annahme:
 - ❖ **ATLAS: $\mu = 1.4 \pm 0.3$**
 - ❖ **CMS: $\mu = 0.9 \pm 0.2$**
- Weitere Eigenschaften
 - **Neutrales Teilchen** (bestätigt) mit **Spin = 0** (Skalar, wichtig!!!)
 - Analyse des Spins über Zerfallswinkelverteilungen:
 - ❖ Schwierige Analyse, alle Daten bis Ende 2012 notwendig

Signalstärke und p-Werte

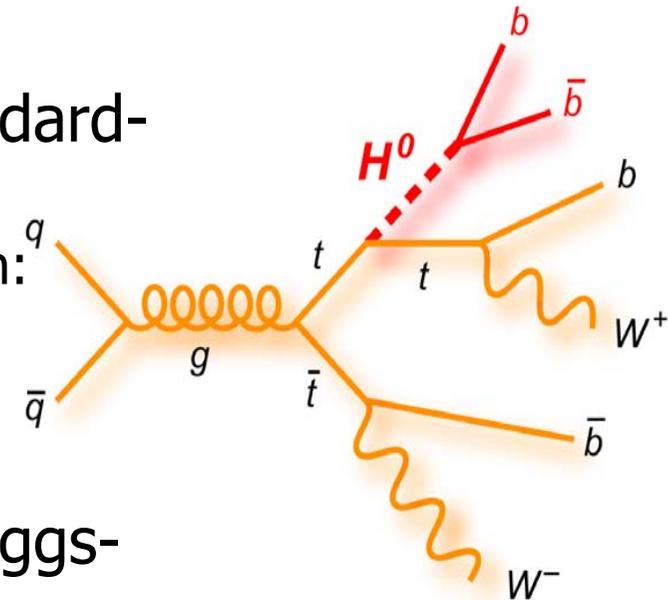


Statistische Auswertung der extrem seltenen Ereignisse: Wie kompatibel ist die Messung mit der "Nicht-Beobachtung", Wahrscheinlichkeit (stat. Relevanz) einer "Inkompatibilität"

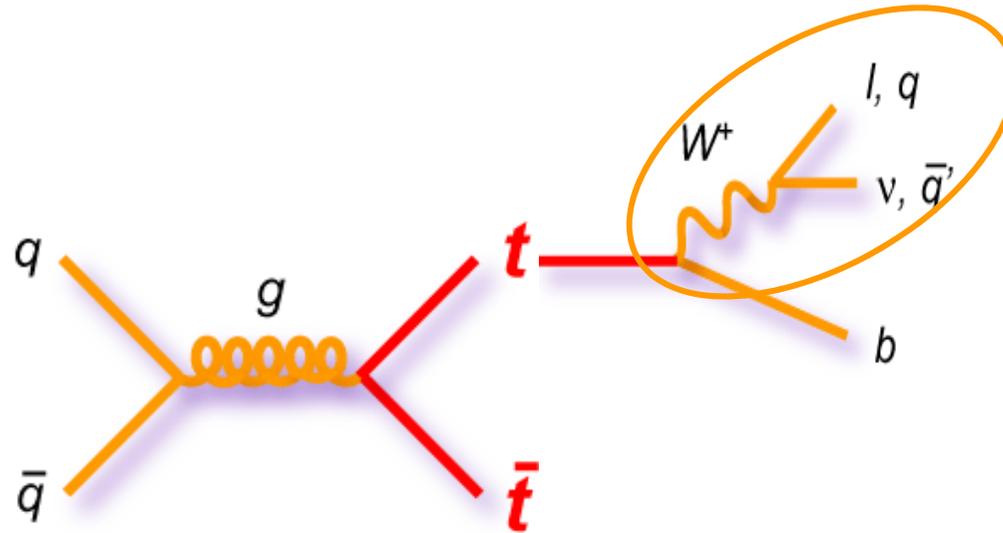
Physik jenseits des Standard-Modelles



- Ist das beobachtete "neutrale Boson" wirklich das Standard-Modell Higgs?
- Theorien für Physik jenseits des Standard-Modelles: Supersymmetrie
 - Postulation von 5 weiteren Higgsbosonen:
 - ❖ 3 neutrale h^0, H^0, A^0
 - ❖ 2 geladene H^\pm
- Messung der Kopplungsstärken hypothetischer supersymmetrischer Higgs-Bosonen
 - Möglich mit einer Genauigkeit von 5- 10% mit den Daten von 2012
 - Bestimmen von "Ausschlussgrenzen" an die Kopplungsstärken



Auf dem Weg zu neuen Teilchen

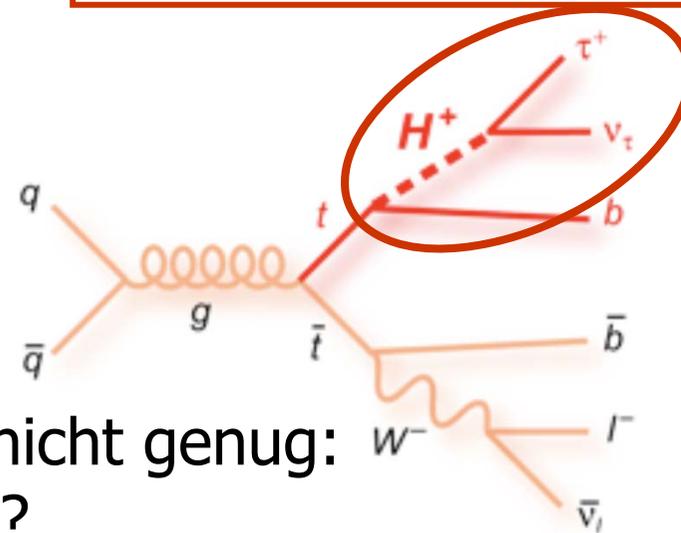


bekannte Theorie: **geladenes W-Boson** (schwache Kraft)

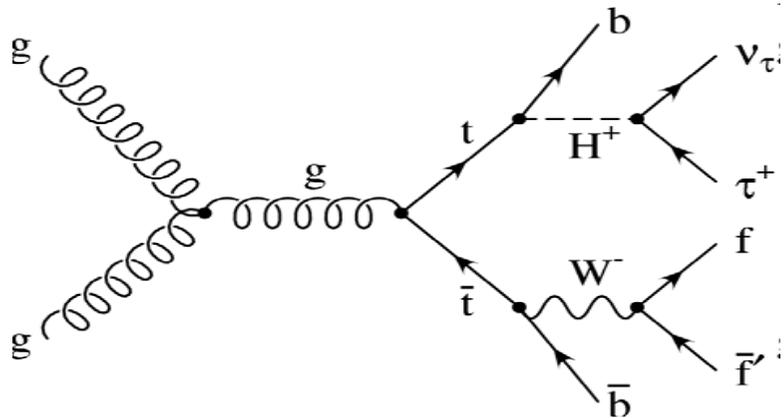
neue Theorie: **geladenes Higgs-Boson** (Supersymmetrie)

Prozesse mit Top-Quarks sind für die Suche nach neuen Phänomenen bzw. neuen Teilchen geeignet.

Entdeckung des Higgsboson noch nicht genug:
Ist es das Teilchen, das wir suchen?



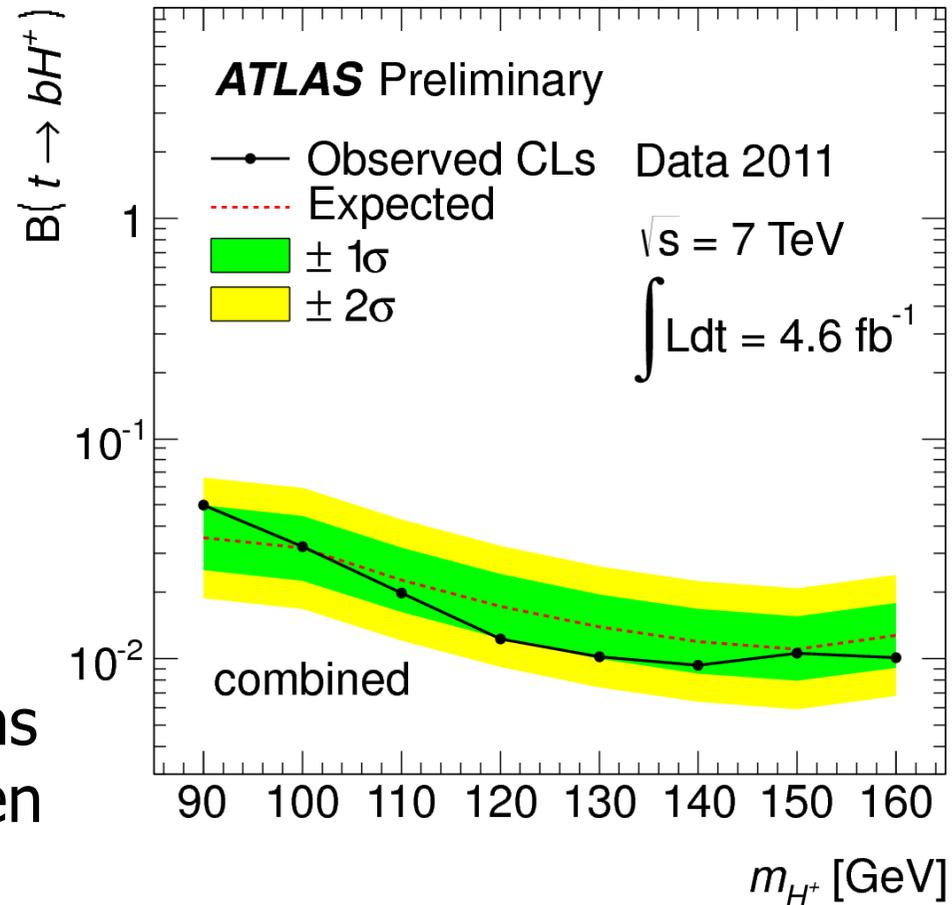
Beispiel der Suche nach neuen Teilchen



Messung:

Obere Grenze an die Produktionswahrscheinlichkeit (Kopplungsstärke) eines geladenen Higgs-Bosons als Funktion der hypothetischen Higgs-Masse

→ **Ausschlussverfahren**



Ausblick



- Daten von LHC von höchster Qualität, alle Erwartungen übertroffen
- **Entdeckung des "Bosons" ist ein Meilenstein der Physik**
- **Datennahme 2012**
 - Erhöhung der Strahlenergie auf 8 TeV
 - Erhöhung der Luminosität, Datensatz erheblich vergrößert
- **Wesentliche Resultate der Analyse der Daten von 2011 / 2012**
 - Mögliche Massenbereiche des Higgs-Bosons stark eingeschränkt
 - Messung eines **"Higgs-artigen" neutralen Bosons bei ~ 126 GeV**
 - Standardmodell exzellent bestätigt in vielen Aspekten
 - Bis jetzt noch **keine Anzeichen für Physik jenseits des Standard Modelles**
- **Ziele für 2013**
 - Eingehende Untersuchungen der Eigenschaften des "neuen Bosons"
 - Messung von Ausschlussgrenzen für "neue Physik"
- **Weiter in die Zukunft:**
 - Upgrade von LHC und Experimente in 2013: Umbaupause
 - Nach 2014: Hochluminositätsphase (Faktor 5) bei Designenergie (14 TeV)