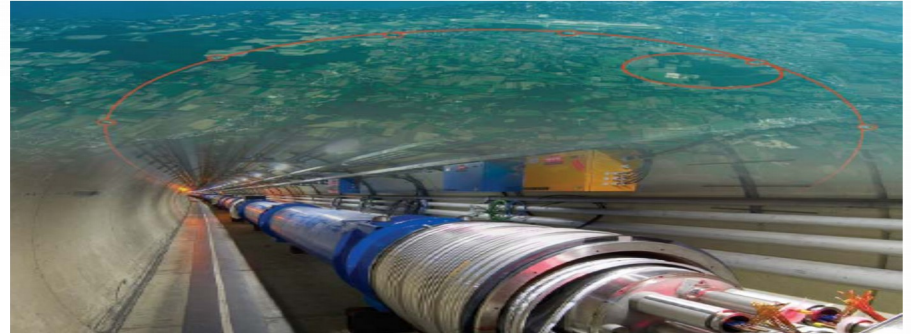
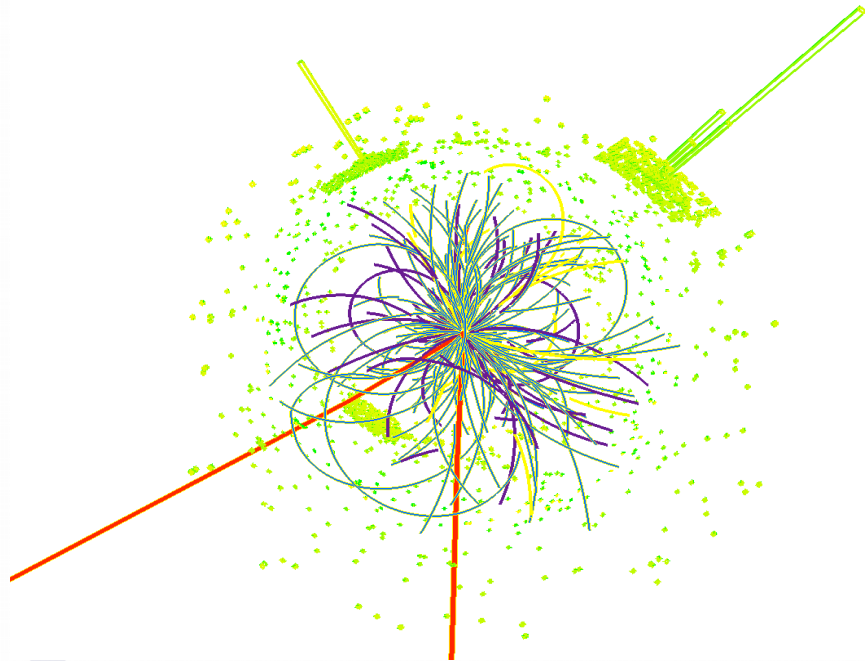
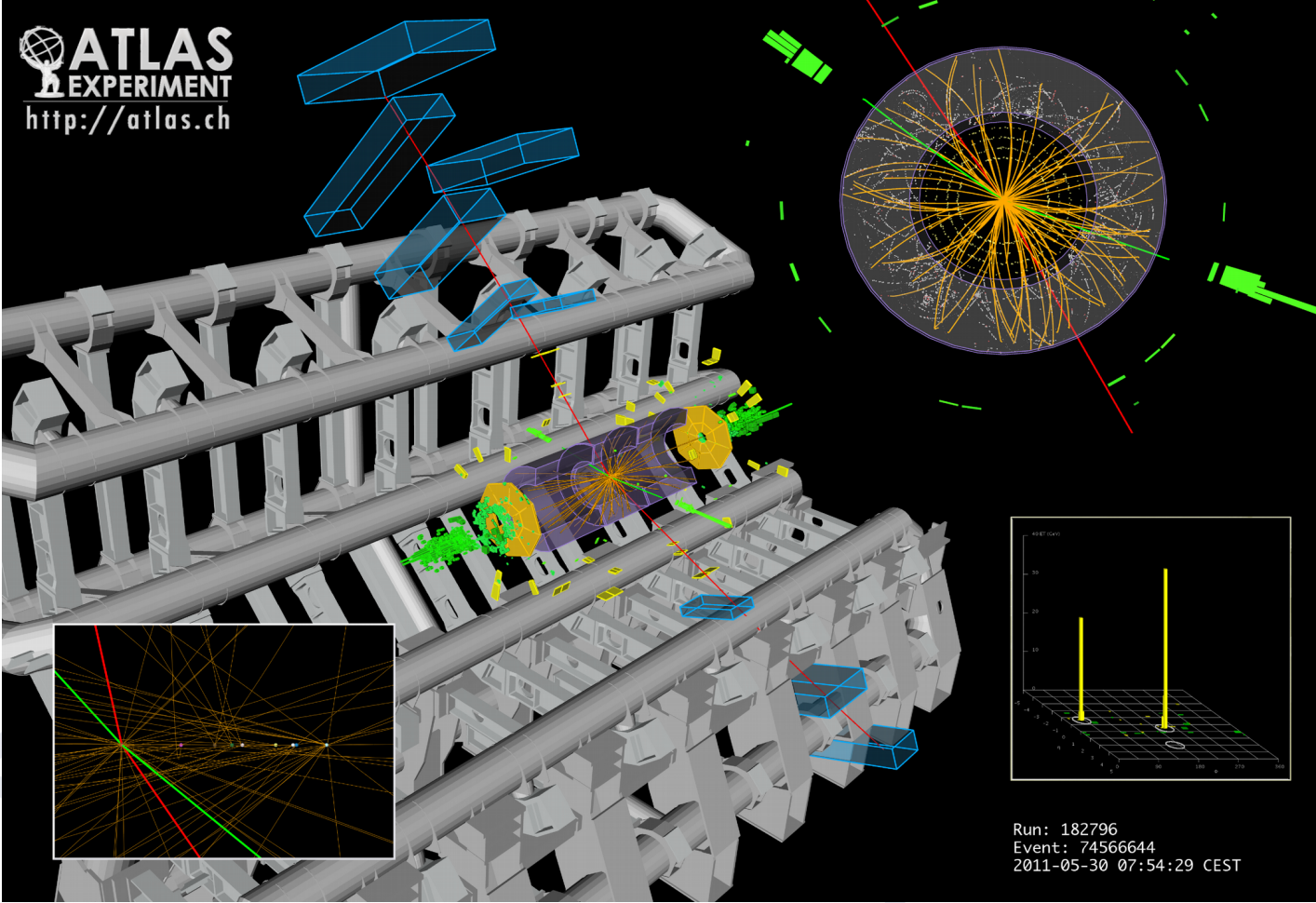


Die Entdeckung des Higgs-Bosons



Dr. Thorsten Kuhl
DESY

Der größte Erfolg 2012: Das Higgs!



Nach dem Higgs: Die Suche geht weiter

1. Laufperiode von 2010 – 2012 (Run 1)

- Sehr erfolgreiche und effiziente Datennahme
- Wichtigstes Resultat: Entdeckung des Higgs-Bosons
- Bestätigung des Standardmodells der Teilchenphysik

Um- und Ausbauphase von 2013 – 2014 (LS1)

- Erhöhung der Strahlenergie auf das Doppelte
- Erhöhung der Strahlintensität
- Einbau neuer Detektoren, Anpassung der Technologien
- Verbesserung der Ereignisauswahl und Datenverarbeitung

Nächste Laufperiode 2015 – 2018 (Run 2)

- Erfolgreiche Datennahme seit Juli 2015
- Bestätigung des Higgs-Bosons
- Intensive Suche nach Physik jenseits des Standardmodells

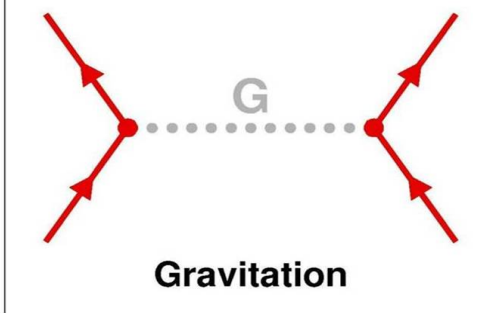
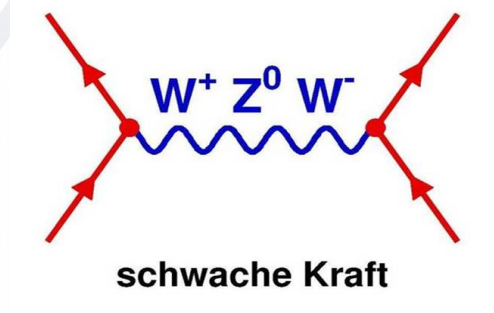
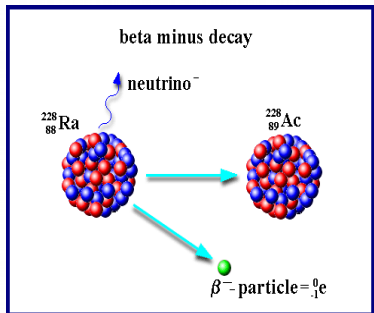
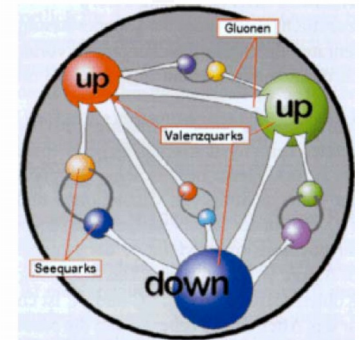
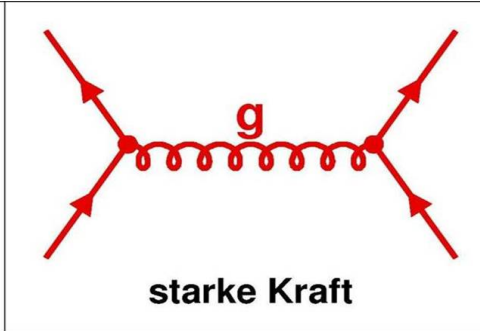
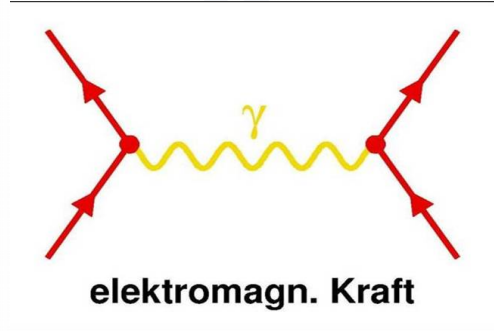
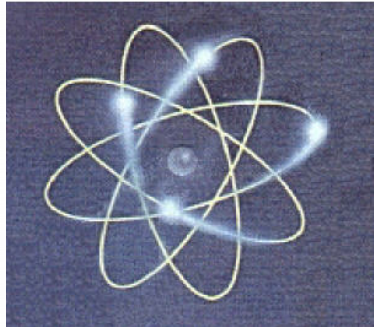
Run 3: 2020 – 2022/23

Großer Upgrade 2023

- Grundlegender Umbau und Erneuerung des ATLAS-Detektors
- Anpassung auf neue Anforderungen



Erinnerung: Austauscheteilchen



Austauschteilchen sind die Quanten der Kraftfelder

Das Standardmodell

Fundamentale Teilchen:

6 Quarks (u, d, c, s, t, b)

6 Leptonen (e, μ , τ , ν_e , ν_μ , ν_τ)

Fundamentale Kräfte:

starke Wechselwirkung (g)

schwache Wechselwirkung (W,Z)

elektromagnetische

Wechselwirkung (γ)

Verantwortlich für die Masse:

Higgs-Boson

sehr erfolgreiches Modell: bisher in allen experimentellen Tests gut bestätigt

Viele richtige Vorhersagen

	mass →	$\approx 2.3 \text{ MeV}/c^2$	$\approx 1.275 \text{ GeV}/c^2$	$\approx 173.07 \text{ GeV}/c^2$	0	$\approx 126 \text{ GeV}/c^2$
	charge →	2/3	2/3	2/3	0	0
	spin →	1/2	1/2	1/2	1	0
		u up	c charm	t top	g gluon	H Higgs boson
QUARKS		$\approx 4.8 \text{ MeV}/c^2$	$\approx 95 \text{ MeV}/c^2$	$\approx 4.18 \text{ GeV}/c^2$	0	
		-1/3	-1/3	-1/3	0	
		1/2	1/2	1/2	1	
		d down	s strange	b bottom	γ photon	
		$0.511 \text{ MeV}/c^2$	$105.7 \text{ MeV}/c^2$	$1.777 \text{ GeV}/c^2$	0	$91.2 \text{ GeV}/c^2$
		-1	-1	-1	0	
		1/2	1/2	1/2	1	
		e electron	μ muon	τ tau	Z Z boson	
LEPTONS		$< 2.2 \text{ eV}/c^2$	$< 0.17 \text{ MeV}/c^2$	$< 15.5 \text{ MeV}/c^2$	± 1	$80.4 \text{ GeV}/c^2$
		0	0	0	1	
		1/2	1/2	1/2	1	
		ν_e electron neutrino	ν_μ muon neutrino	ν_τ tau neutrino	W W boson	
						GAUGE BOSONS

Ursprung der Masse: Higgs-Teilchen

Standardmodell:

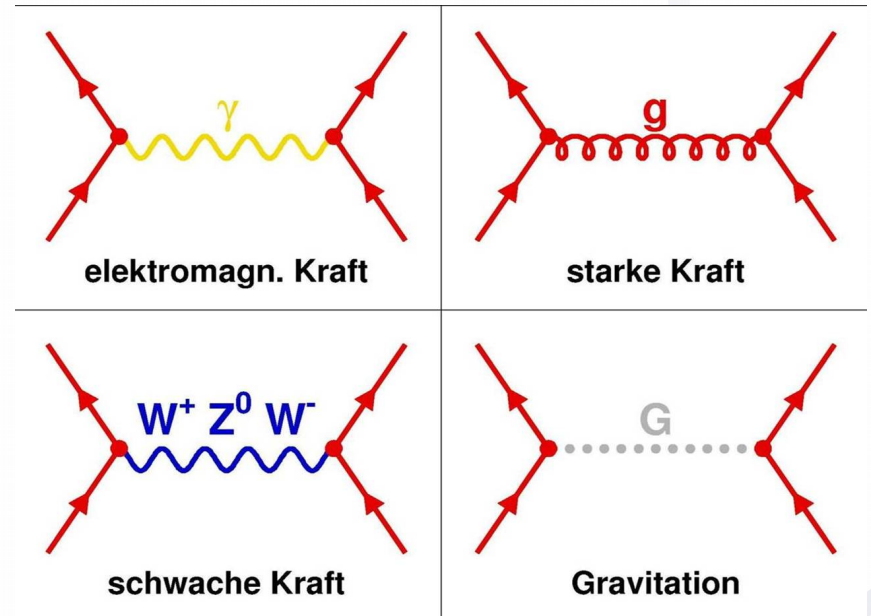
perfekte Symmetrie ohne Masse
Kräfte durch Symmetrien beschreibbar

Forderung:

Austauschteilchen müssen masselos sein
Erfüllt für Photon und Gluon,
Aber nicht für W^- und Z -Bosonen

Konsequenz:

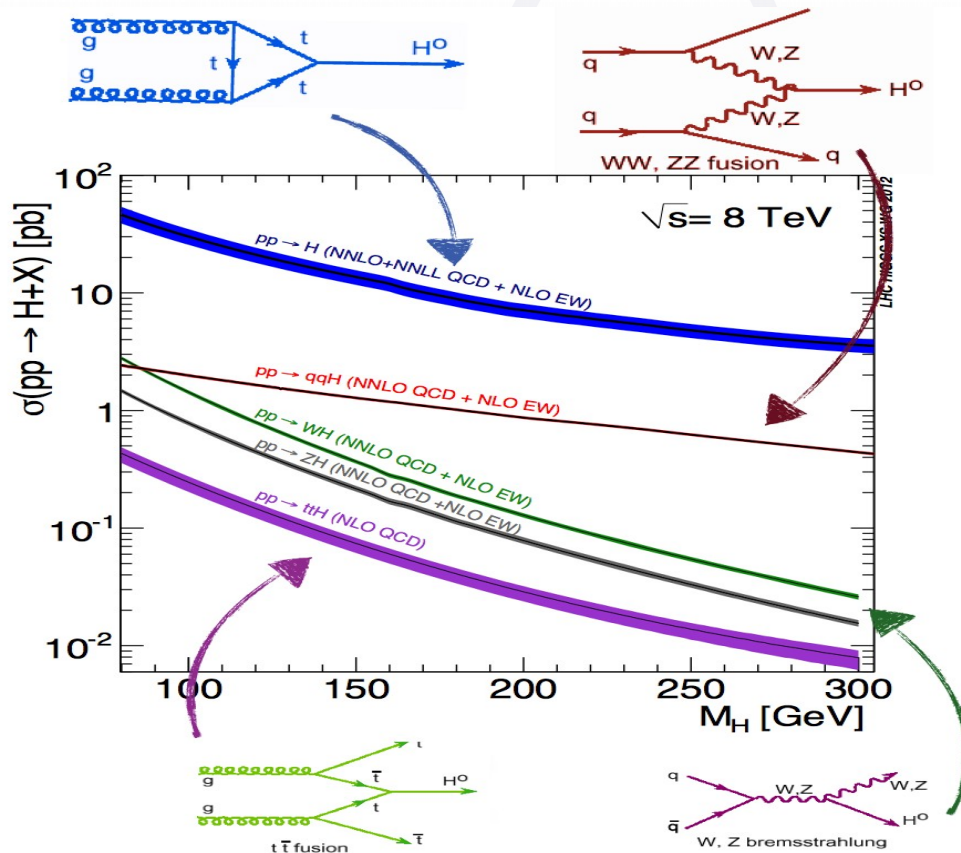
Symmetrie muss gebrochen sein
Symmetriebrechung erzeugt neues, massives Feld: Higgs-Feld
Konsequenz der Symmetrie-Brechung: W^- und Z -Bosonen werden massiv
Erzeugung von Massen durch Kopplung an das Higgs-Feld
Teil des Standardmodells, keine "neue Physik"
Entdeckung 2012 am LHC



Higgs-Produktion

Das Higgs koppelt an die Masse:

Produktion mit schweren Teilchen dominant \rightarrow sehr seltene Prozesse

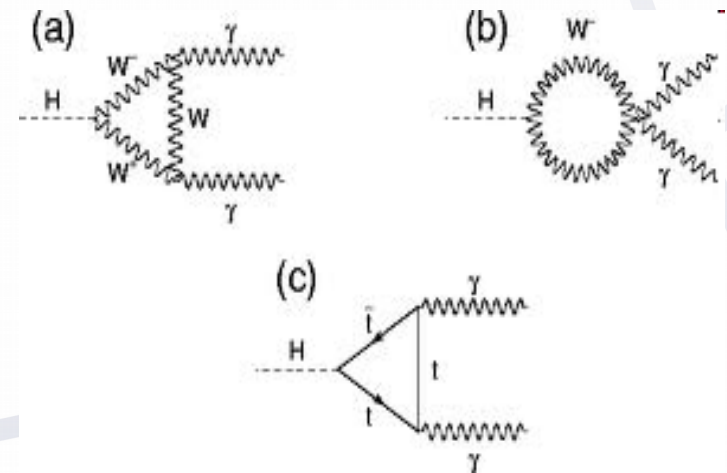
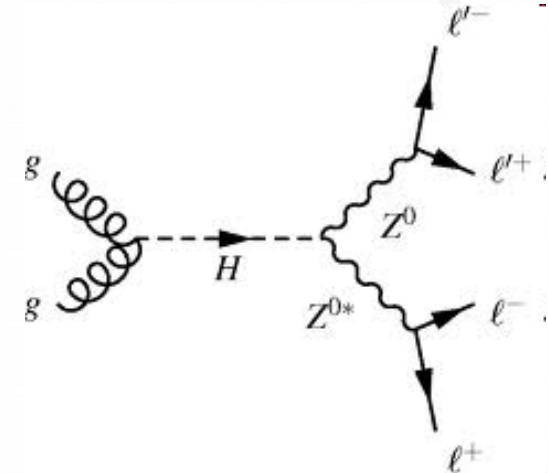
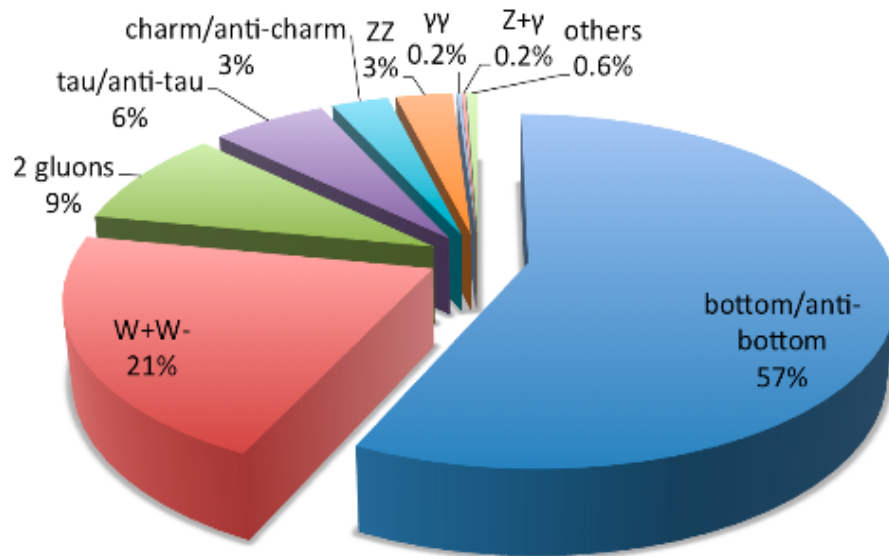


Higgs-Zerfälle

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

- sehr seltene Prozesse
- schwer vom Untergrund zu trennen

Decays of a 125 GeV Standard-Model Higgs boson

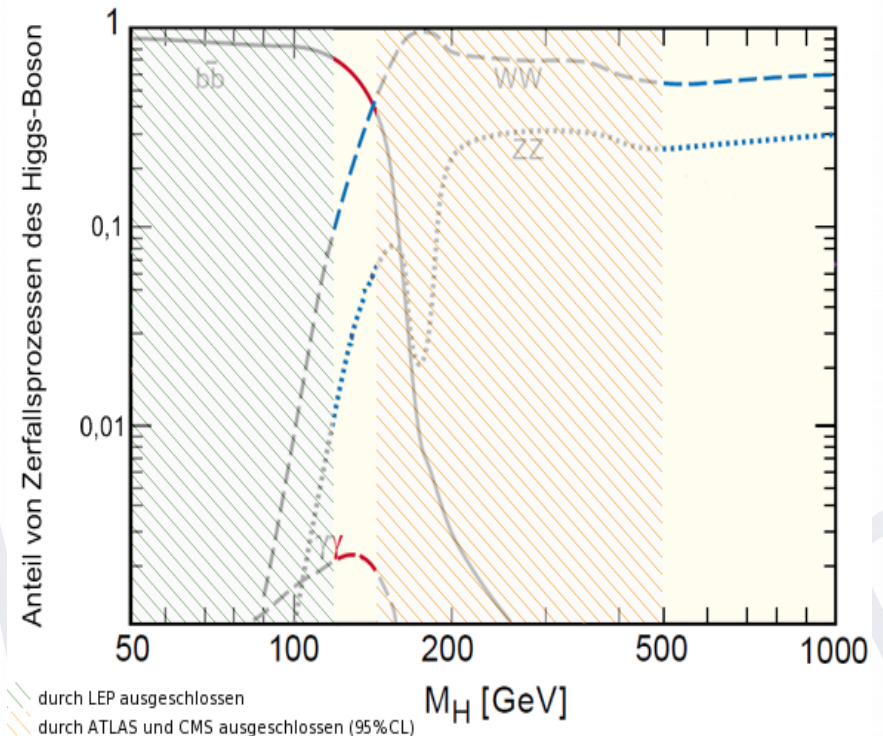


Bereiche möglicher Higgs-Kandidaten

Bereiche der Higgs-Massen, die vor der Entdeckung nicht durch Experimente "ausgeschlossen" wurden,

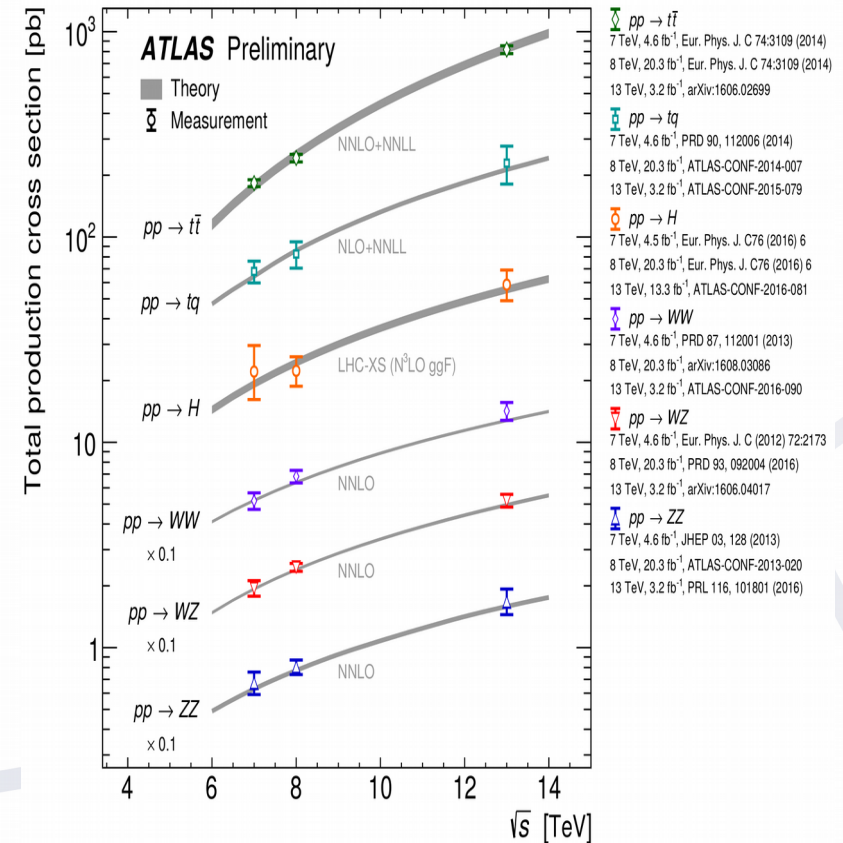
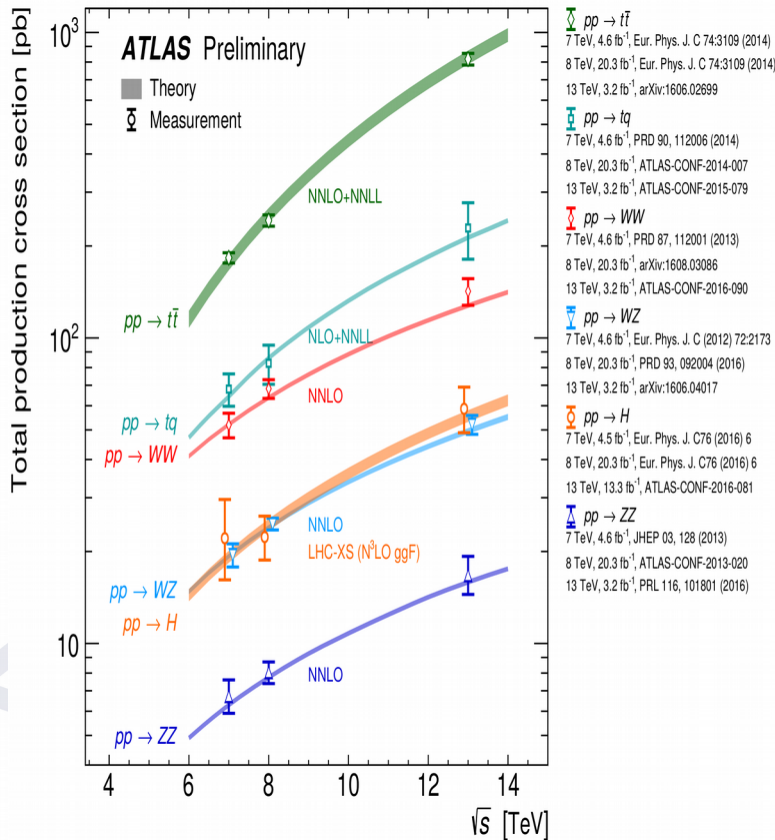
SM bevorzugt ein leichtes Higgs:

- Schwierigster Bereich!
- W- und Z-Bosonen wichtig für die Messung

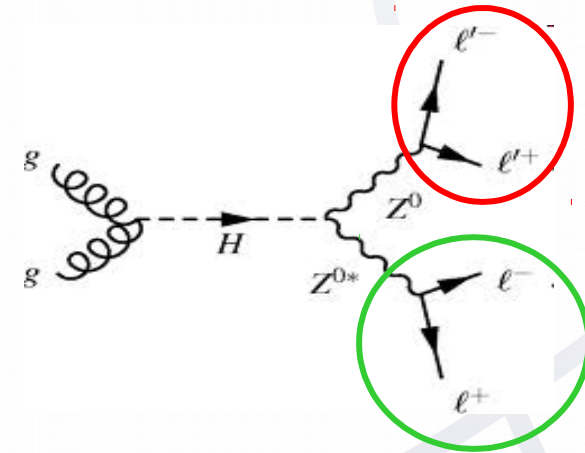
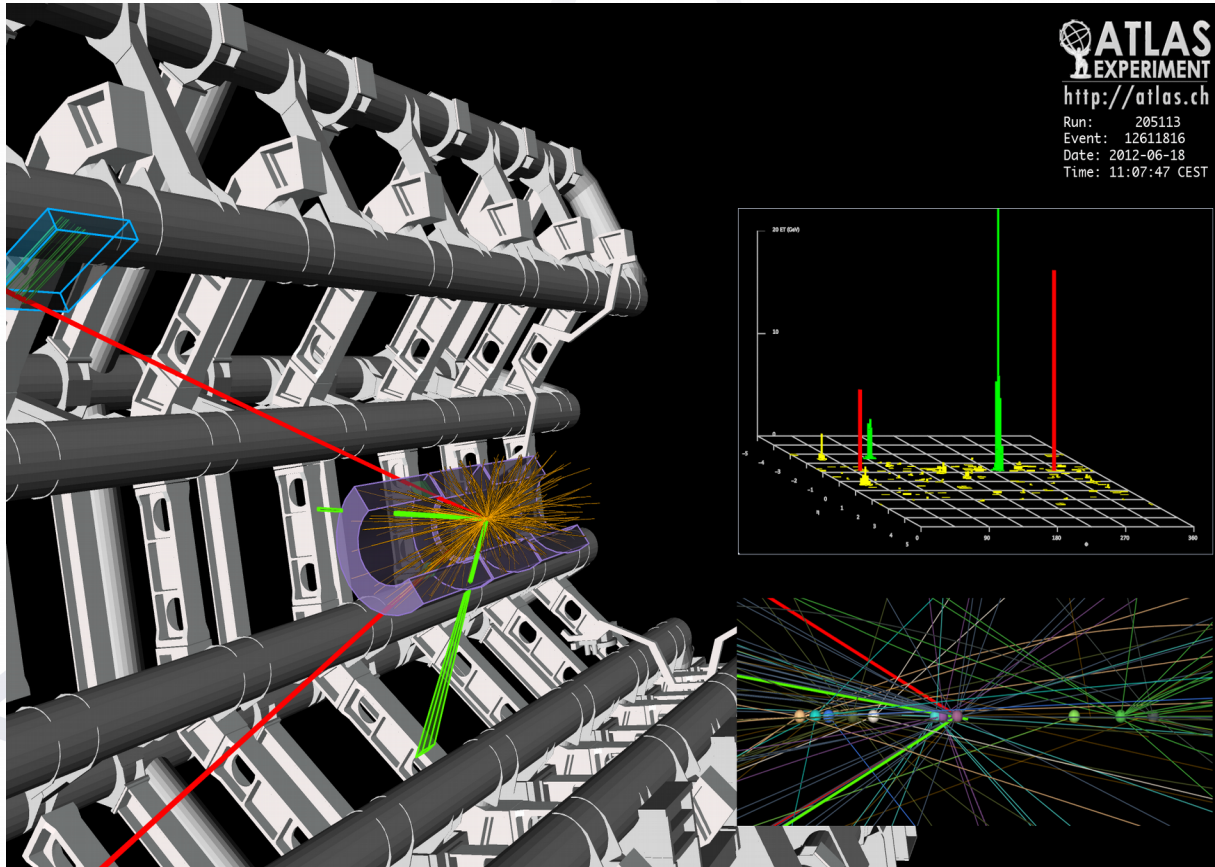


Vermessung des Standardmodells

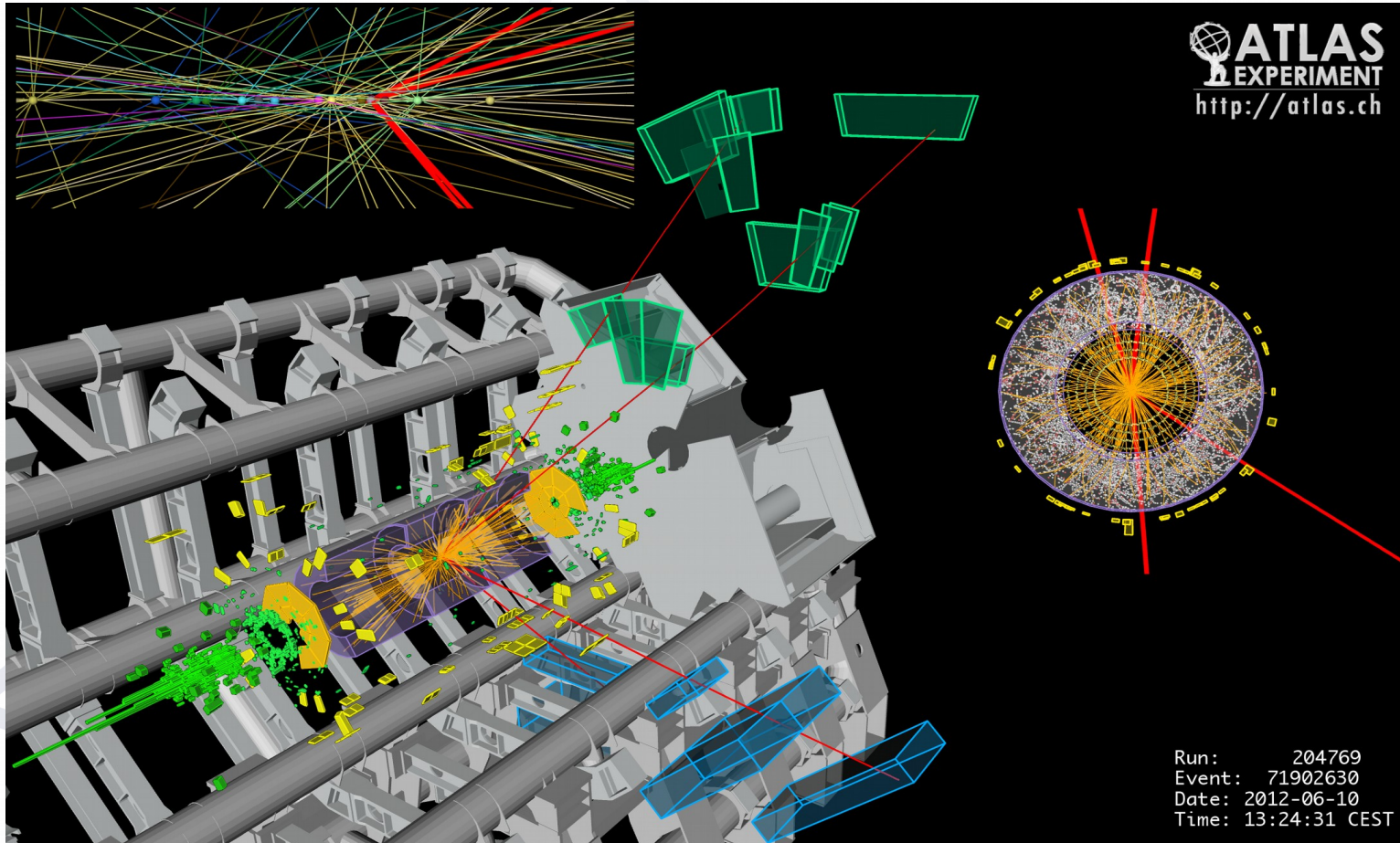
Alle Messungen sind in perfekter Übereinstimmung mit dem Standardmodell
 -> essentielle Voraussetzung für Suche nach neuer Physik



Higgs-Zerfall in zwei Z-Bosonen und in 4 Leptonen

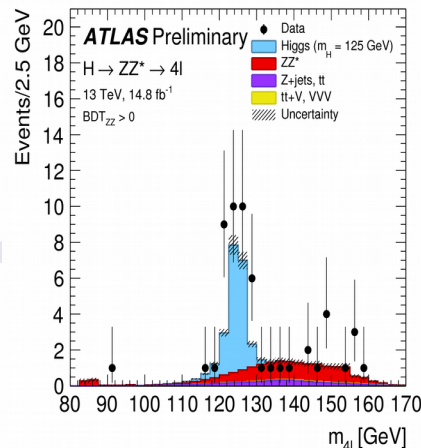
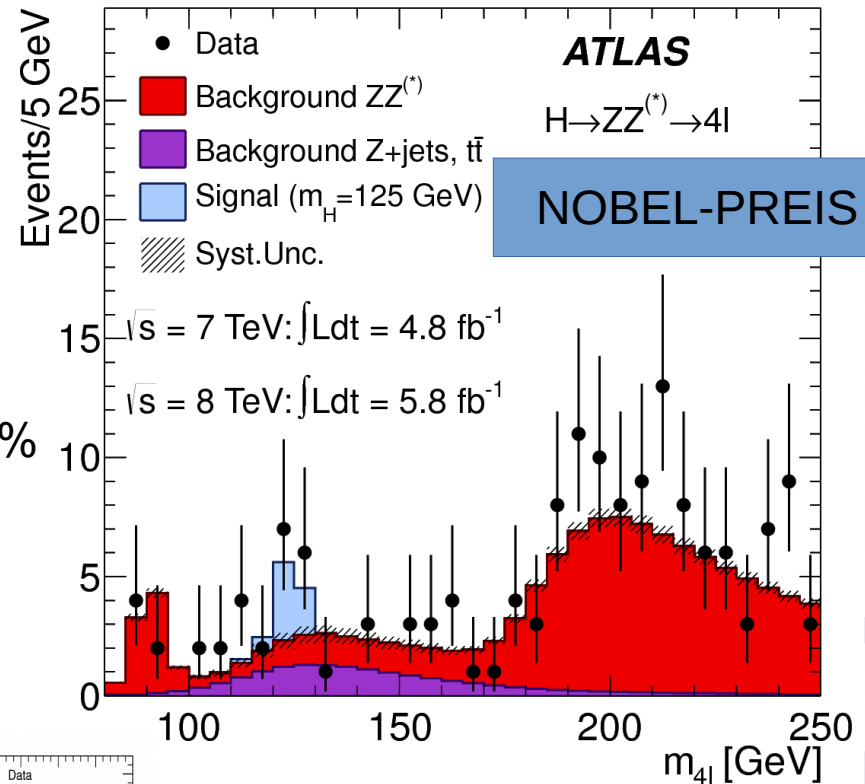


Zerfall in Higgs nach 4 Myon

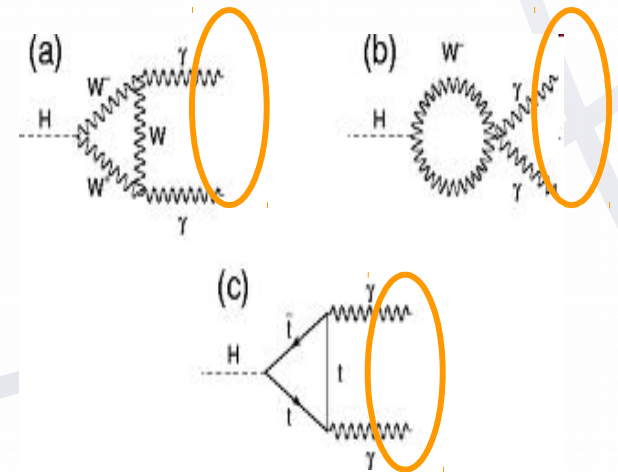
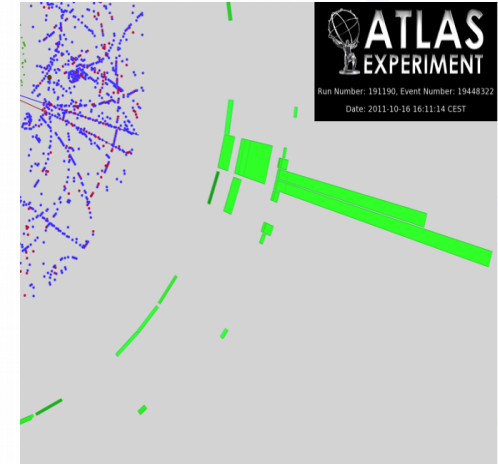
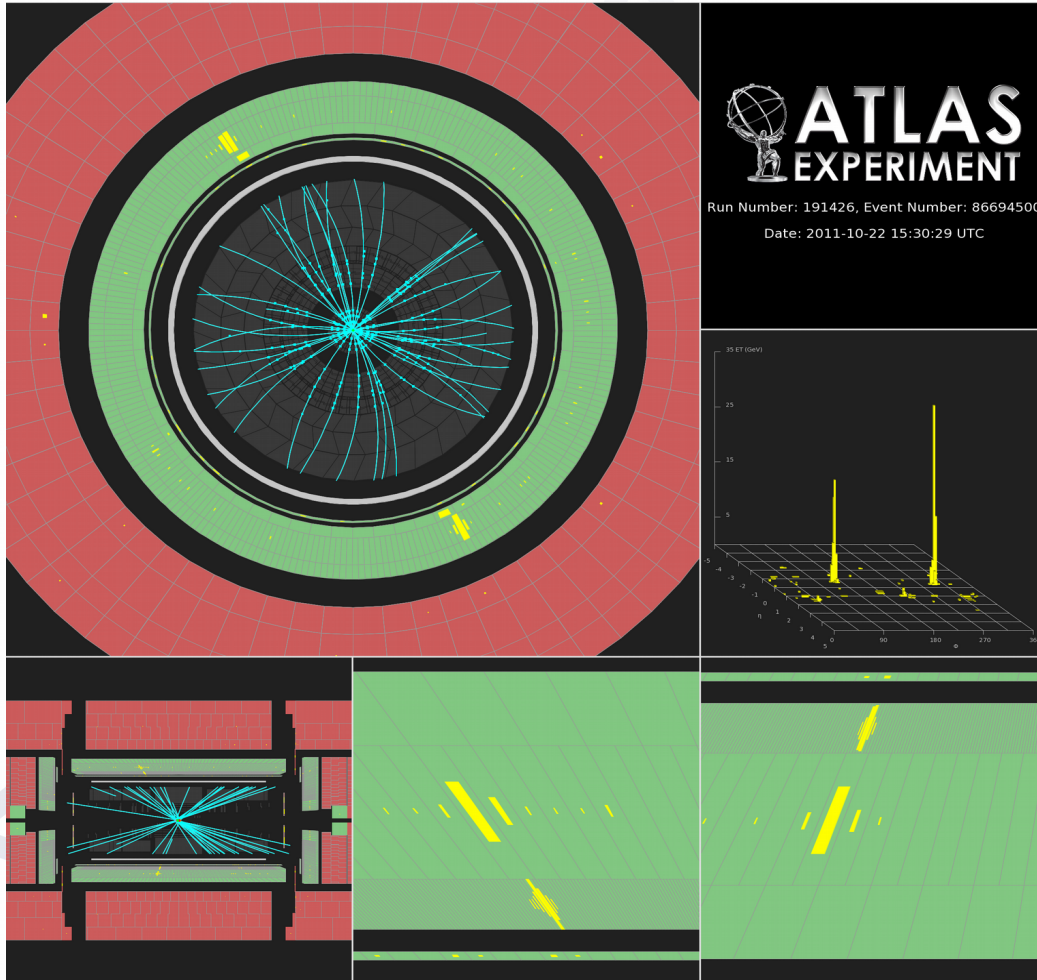


Resultate des 4 Lepton Kanales

- 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%
- In perfekter Übereinstimmung mit der Messung von 2012
- Sehr klare Signatur:
 - **Größtes Entdeckungspotential**

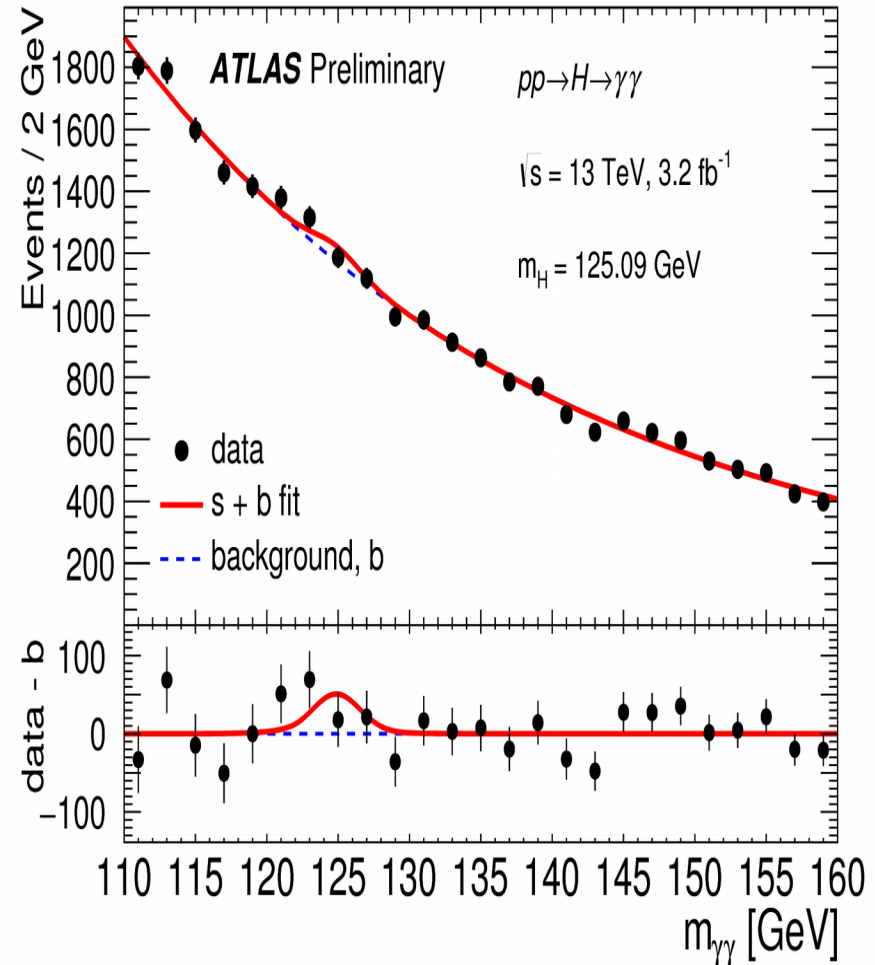


Higgs-Zerfall in zwei Photonen



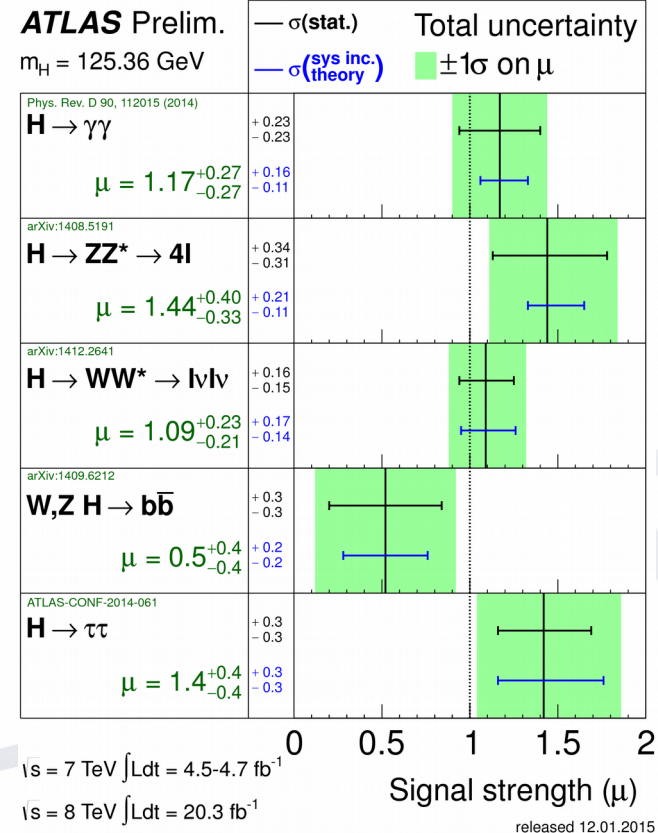
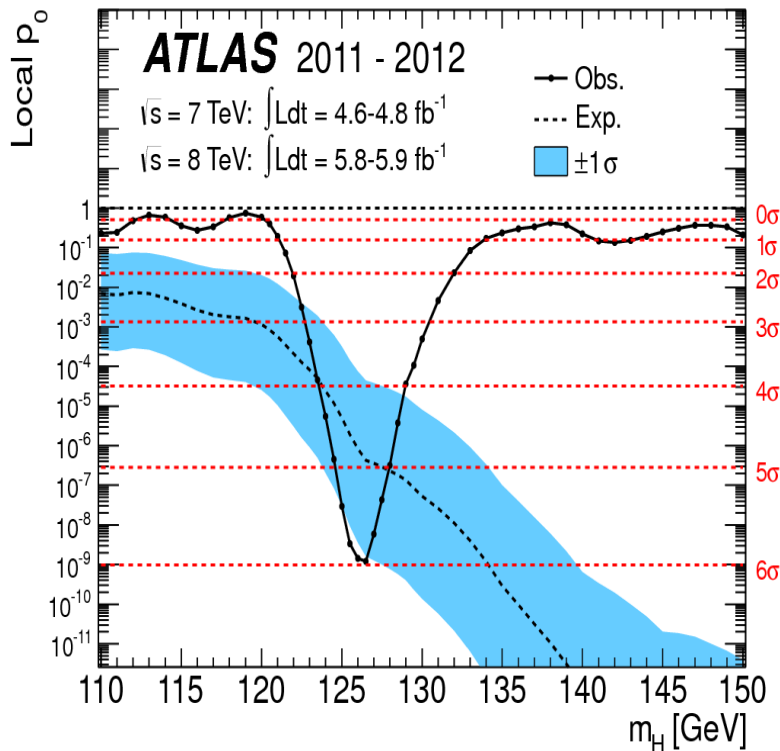
Resultat der Suche nach $H \rightarrow \gamma\gamma$

- 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 %
- Stimmt perfekt mit der Messung von 2012 überein



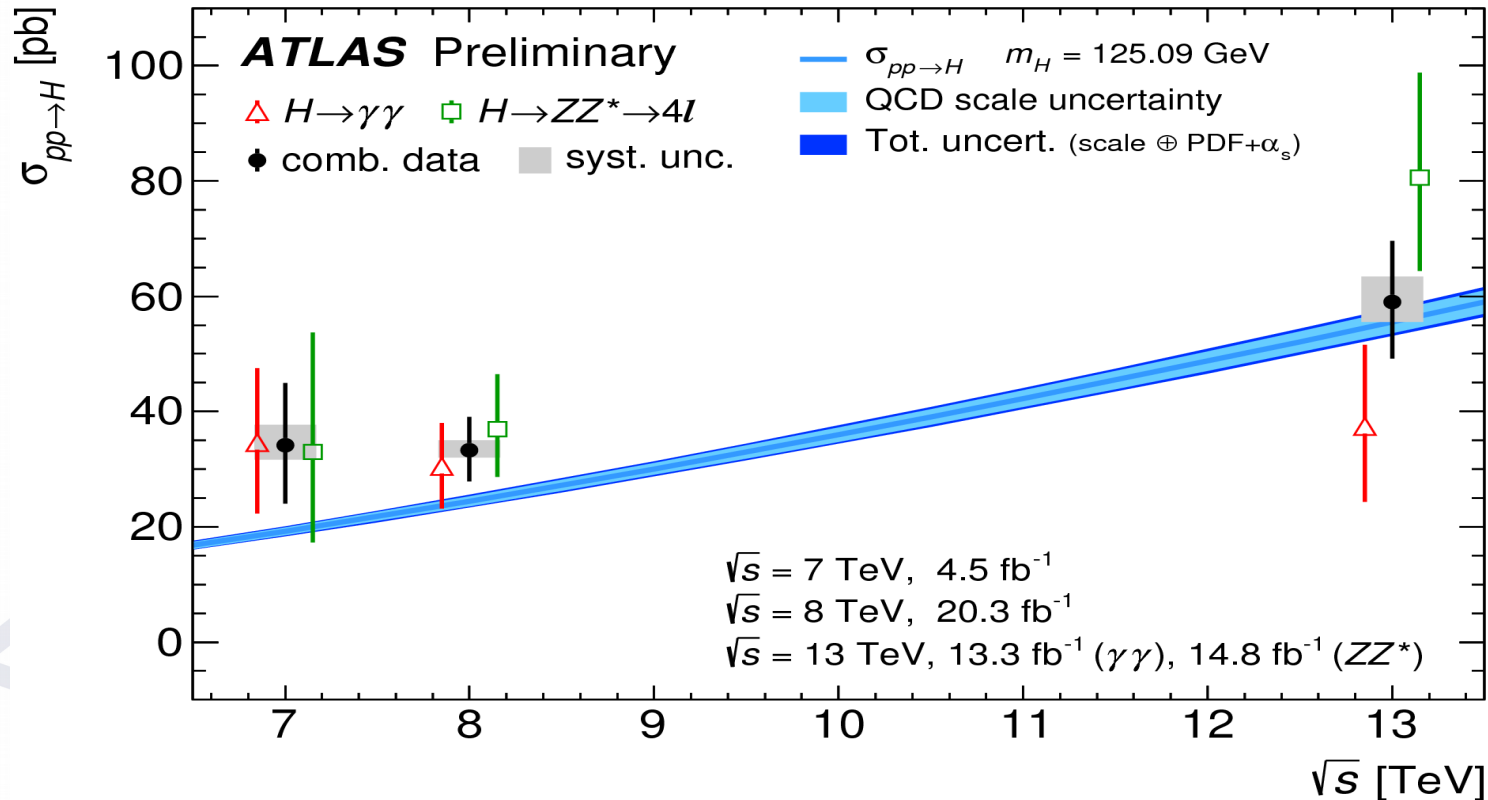
Das SM-Higgs ist eindeutig gefunden

Das “new Boson” ist ein Higgs! Das Higgs ist in den Daten bei 13 TeV bestätigt worden. Gibt es noch mehr Higgs-Bosonen → Hinweise auf neue Physik?



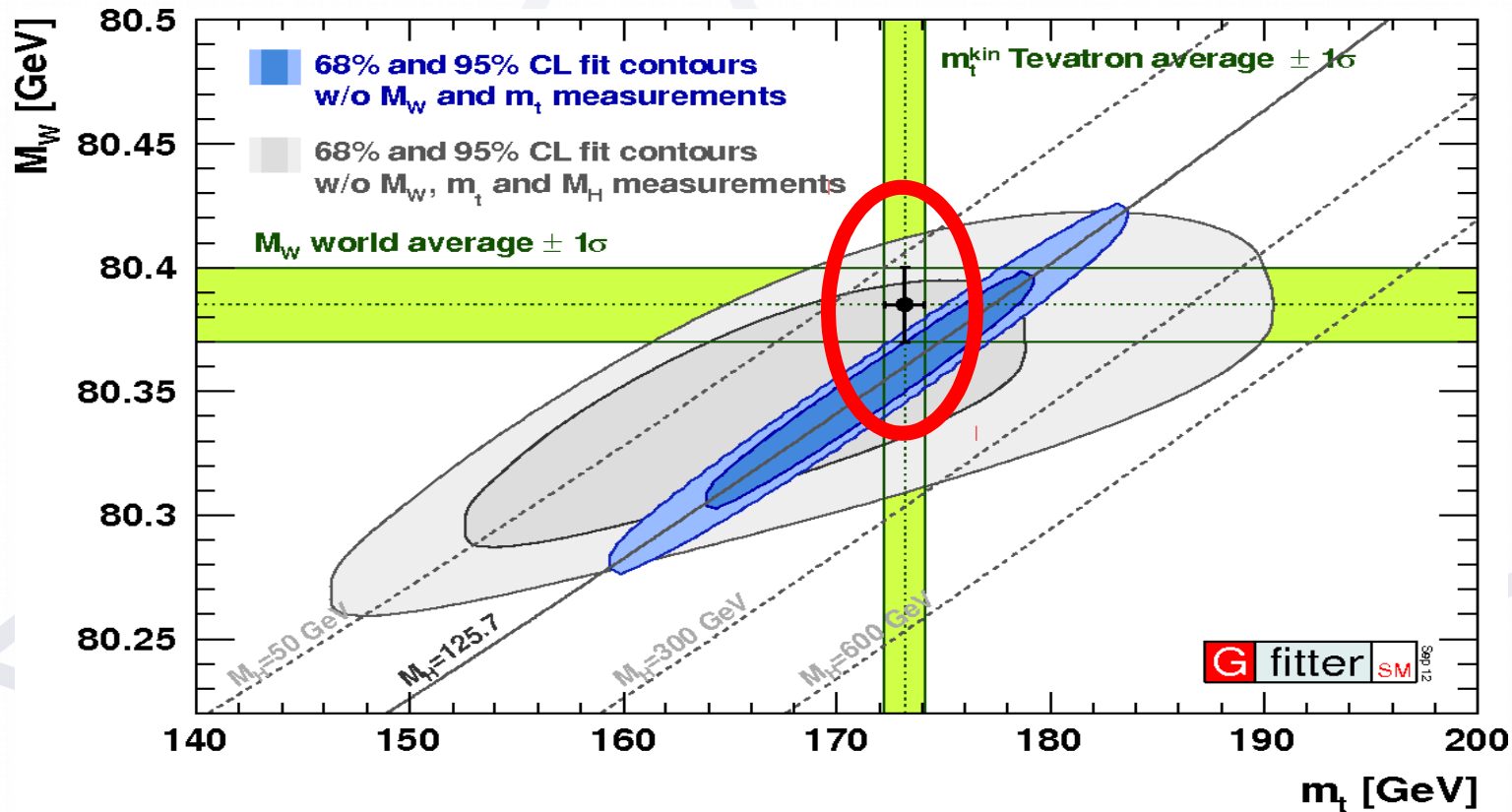
Beschreibung des Higgs im SM

Das Higgs-Boson ist Teil des Standardmodells und das SM kann das Higgs-Boson gut beschreiben



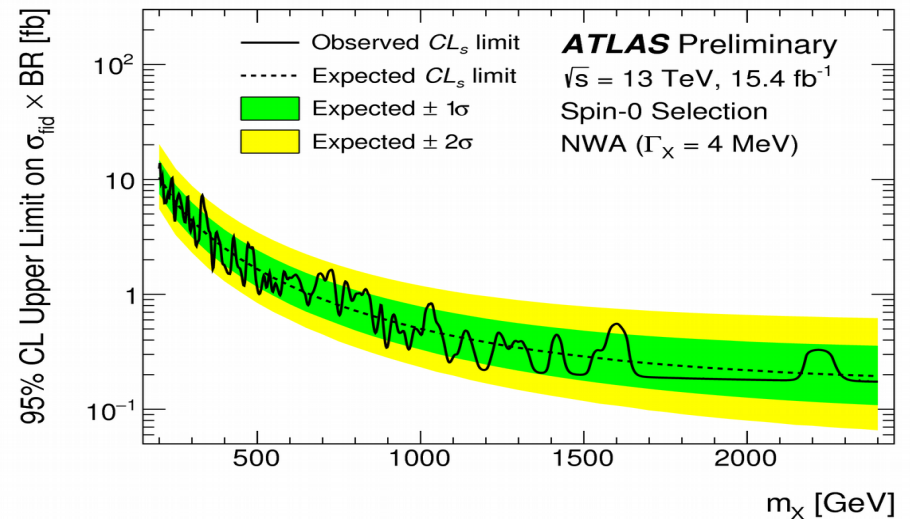
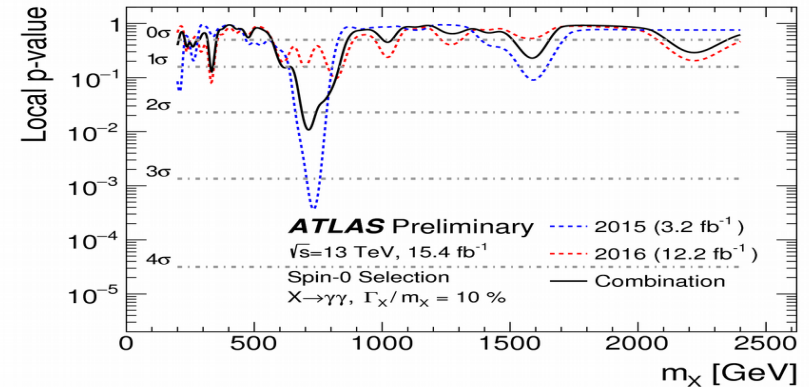
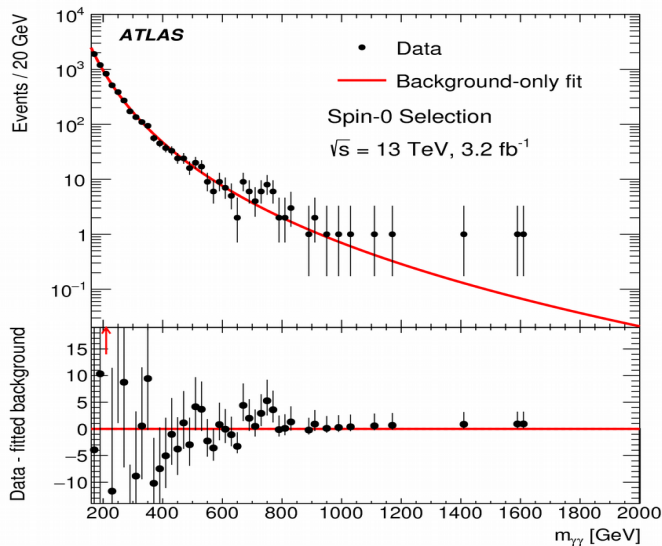
Messung W/top Masse im Vergleich zu Higgs-Masse

Spannung zwischen Theorie und Experiment



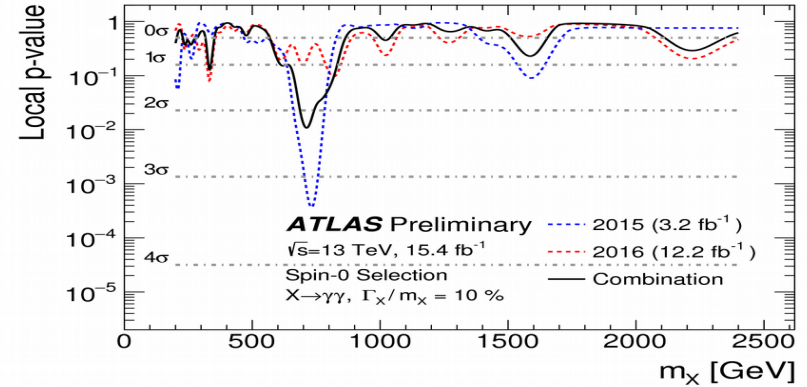
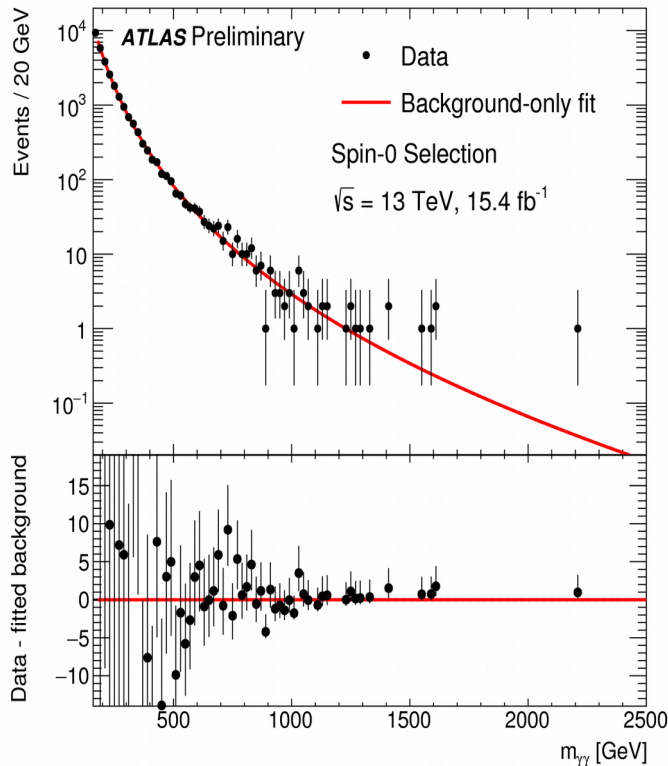
Di-Photon Search 2015

- Gleicher Zerfallskanal wie beim Higgs
- Suche bei höheren Massen
- Anzeichen eines Signales im Jahr 2015
- Extensive Studien zur Signifikanz
- Größer als eine statistische Schwankung
- Hinweis auf ein neues Teilchen??

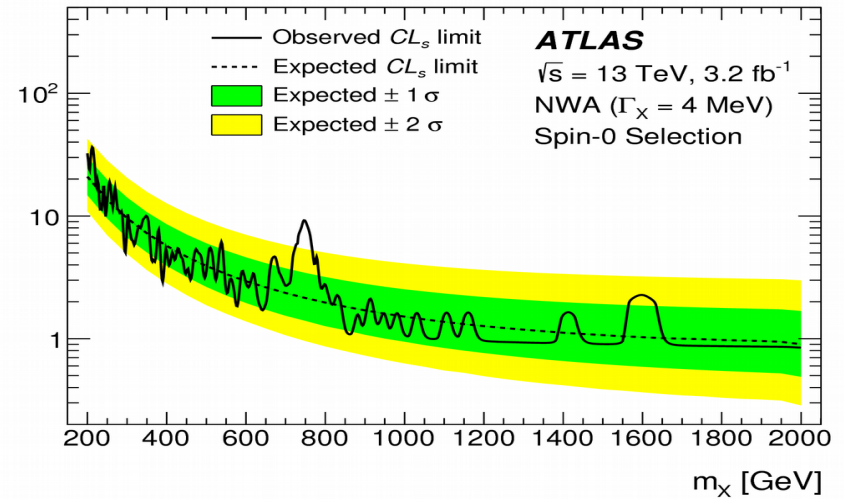


Gleiche Suche mit neuen Daten

- Signal hat sich leider nicht bestätigt
- ABER: ganz normale statistische Fluktuation



95% CL Upper Limit on $\sigma_{\text{fid}} \times \text{BR} [\text{fb}]$

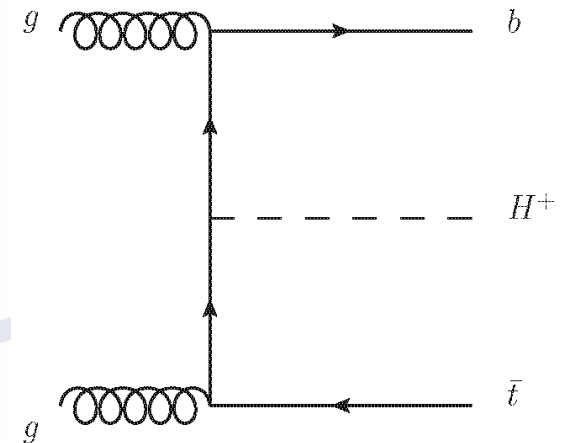
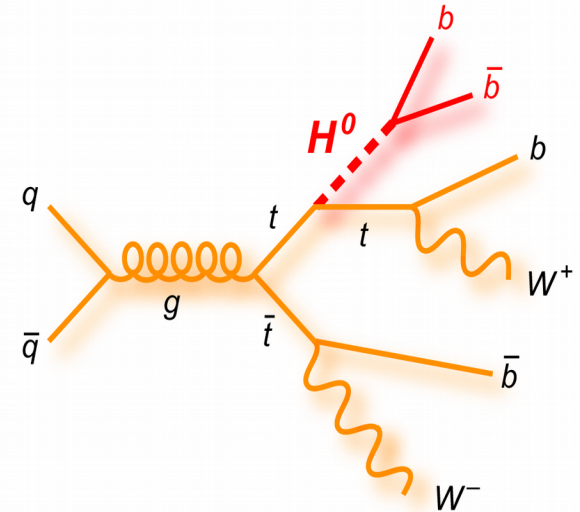


Physik jenseits des Standardmodells

- Ist das Standardmodell Higgs das einzige Higgs-artige Teilchen?
- Theorien für Physik jenseits des Standardmodells: Supersymmetrie

Postulation von 5 weiteren Higgs-Bosonen:

- 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

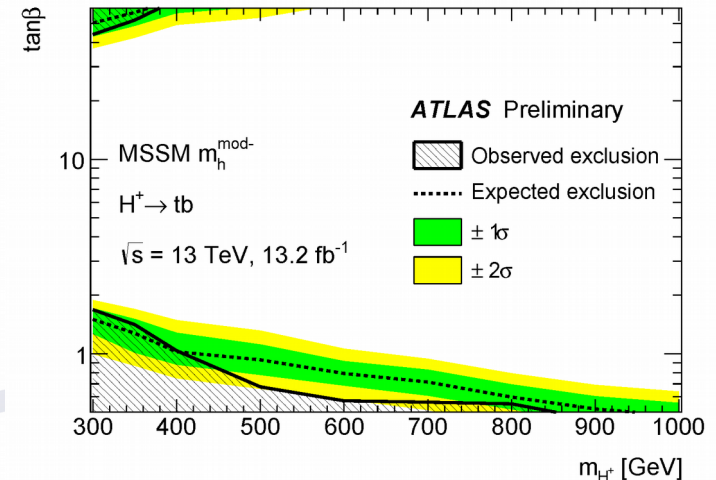
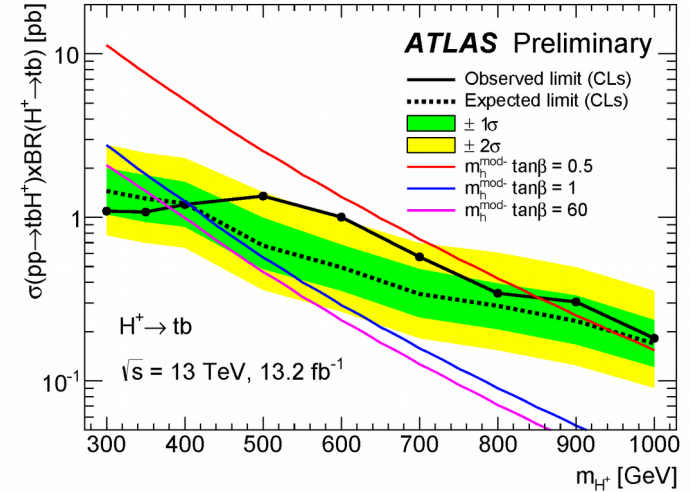
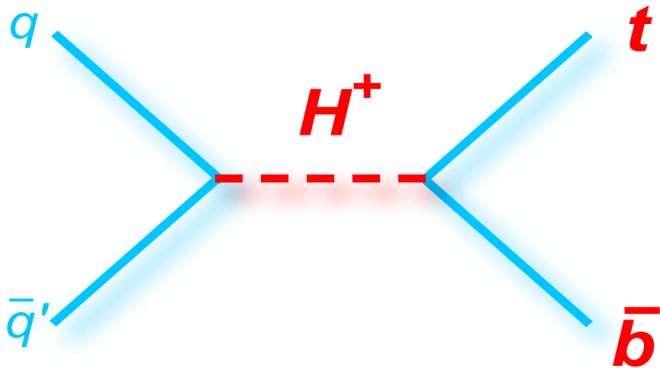


Suche nach neuen Teilchen: Higgs

Messung:

Obere Grenze an die Produktions-Wahrscheinlichkeit eines geladenen Higgs-Bosons als Funktion der hypothetischen Higgs-Masse

→ **Ausschlussverfahren**



Ausblick

Entdeckung des Higgs ist ein Meilenstein der Physik

- Erfolgreiche Datennahme von 2010 – 2012 und 2015 – 2016
- Wesentliche Resultate der Analysen von 2011 / 2012
- Entdeckung des Higgs-Bosons bei ~ 126 GeV
- Standardmodell exzellent bestätigt in vielen Aspekten
- keine Anzeichen für Physik jenseits des Standardmodells
- Viele Modelle konnten ausgeschlossen bzw. eingegrenzt werden

Ziele für 2015 - 2017

- Eingehendes Untersuchen der Eigenschaften des Higgs-Bosons
- Präzisionsmessung der Parameter des Standardmodells
- Messung von Ausschlussgrenzen für “neue Physik”
- Suche nach neuen Teilchen
- Wegweisende Resultate für die Zukunft unabhängig von den Resultaten

Run3: Luminositätsverdopplung, ttH

Nächster Upgrade 2025:

- nächste Ausbaustufe zu höheren Strahlintensitäten
- Upgrade der Detektor- und Datennahme-Technologien

Es bleibt unglaublich spannend!

