

---

# Die Entdeckung des Higgs-Bosons

---

Patrick Schmidt

**11. Januar 2019**

## Inhaltsverzeichnis

**Einordnung in die Geschichte der Teilchenphysik**

**Theorie**

**Experimentelle Suche**

**Entdeckung**

**Seit 2012**

## **Einordnung in die Geschichte der Teilchenphysik**

Theoretische Einordnung

Experimentellen Suche

Theorie

Experimentelle Suche

Entdeckung

Seit 2012

## Theoretische Einordnung

- 1933 Fermis Theorie des  $\beta$ -Zerfalls
- Späte 50er Erklärung des  $\beta$ -Zerfalls mit Hilfe des Neutrinos
- 1956/58 V-A-Theorie
- 1962 Beweis des Goldstone-Theorems  
→ Masselose Bosonen bei Symmetriebrechung (Goldstone-Bosonen)
- Bis 1964 keine Erklärung der Teilchenmassen  
→ Higgs-Mechanismus löst Problem durch Einführung des Higgs-Feldes
- GSW-Theorie / Erstellung des Standardmodells der Teilchenphysik

## Experimentellen Suche

- 1977 Entdeckung des bottom-Quarks
- 1983 Nachweis des  $W/Z$ -Bosons
- 1995 Entdeckung des Top-Quark
- 2001 Entdeckung des  $\nu_\tau$
- 4. Juli 2012 Entdeckung des Higgs-Bosons

# Einordnung in die Geschichte der Teilchenphysik

## Theorie

Spontane Symmetriebrechung

Higgs-Mechanismus des Standardmodells

Auswirkungen im SM

Das Higgs-Boson

## Experimentelle Suche

## Entdeckung

Seit 2012

## Spontane Symmetriebrechung

- Elementare Wechselwirkungen unterliegen Symmetrien
  - $U(1)$ ,  $SU(2)$ ,  $SU(3)$ ,  $SU(2) \times U(1)$
- Spontane Symmetriebrechungen:
  - Minima des Potentials vom Ursprung verschoben
  - Einsetzen des neuen Minimums
    - Neue Abhängigkeiten
    - Masselose Eichbosonen (Goldstone-Theorem)

## Spontane Symmetriebrechung

- Einfaches Beispiel:
- Lagrangian mit erhaltener Symmetrie:

$$\mathcal{L} = \frac{1}{2} (\partial_\mu \Phi)^2 - \frac{1}{2} m^2 \Phi^2 - \frac{\lambda}{4} \phi^4$$

- Ersetze  $m \rightarrow -\mu^2$  in Potential und betrachte  $\mu^2 < 0$

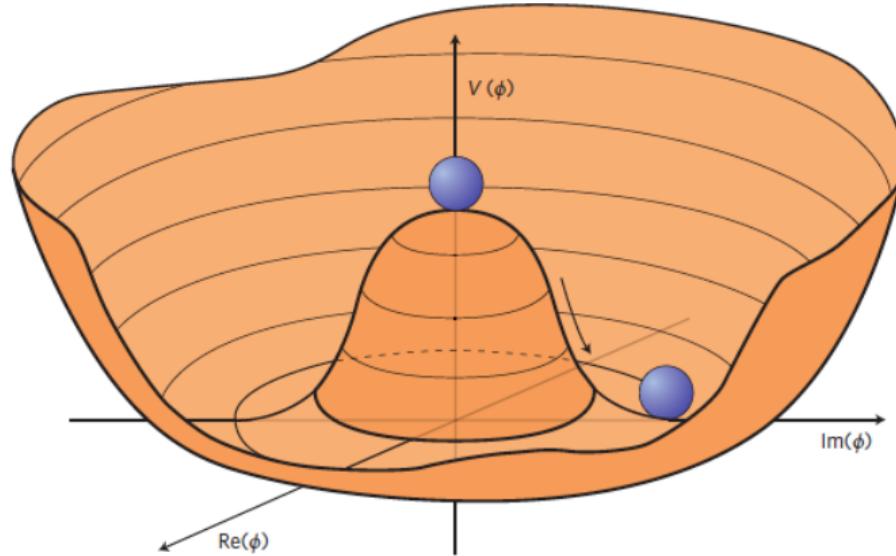
$$V(\Phi) = -\frac{1}{2} \mu^2 \Phi^2 + \frac{\lambda}{4} \phi^4$$

- Nun Minimum beschrieben durch:

$$\Phi_0 = \pm v \pm \sqrt{\frac{6}{\lambda}} \mu = \pm v \pm \sigma$$

- Einsetzen ergibt neuen Lagrangian mit versteckten (spontan gebrochenen) Symmetrien

$$\mathcal{L} = \frac{1}{2} (\partial_\mu \sigma)^2 - \frac{1}{2} (2\mu^2) \sigma^2 - \sqrt{\frac{\lambda}{6}} \mu \sigma^3 - \frac{\lambda}{4} \sigma^4$$



**Abbildung:** Graphische Darstellung des "Mexican Hat Potentials"/Higgs-Potentials [1].

## Higgs-Mechanismus

- Verwendetes Doublet des schwachen Isospins:

$$\phi = \begin{pmatrix} \phi^+ \\ \phi^0 \end{pmatrix} = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{pmatrix} \phi_1 + i\phi_2 \\ \phi_3 + i\phi_4 \end{pmatrix} \quad (1)$$

- $\phi^0$ : ungeladenes Feld,  $\phi^+$ : geladenes Feld
- Symmetriebrechung: Bedingung für Minima für  $\mu^2 < 0$

$$\phi^\dagger \phi = \frac{1}{2} (\phi_1^2 + \phi_2^2 + \phi_3^2 + \phi_4^2) = \frac{\nu^2}{2} = -\frac{\mu^2}{2\lambda} \quad (2)$$

- nichtverschwindener Vakuumserwartungswert  $\nu$  von  $\phi^0$ :

$$\langle 0 | \phi_0 | 0 \rangle = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{pmatrix} 0 \\ \nu \end{pmatrix} \quad (3)$$

## Auswirkungen im SM

- Anwendung des Higgs-Mechanismus auf  $SU(2) \times U(1)$ -Symmetrie:

$$D_\mu \Phi = (\partial_\mu - ig A_\mu^i \tau^a - i \frac{1}{2} g' B_\mu) \Phi$$

- Daraus folgt Glashow-Salam-Weinberg-(GSW)-Modell/Standardmodell

$$W_\mu^\pm = \frac{1}{\sqrt{2}} (A_\mu^1 \mp i A_\mu^2) \quad \text{mit Masse } m_W = g \frac{v}{2}$$

$$Z_\mu^0 = \frac{1}{\sqrt{g^2 + g'^2}} (g A^3 \mu - g' B_\mu) \quad \text{mit Masse } m_Z = \sqrt{g^2 + g'^2} \frac{v}{2}$$

$$A_\mu = \frac{1}{\sqrt{g^2 + g'^2}} (g A^3 \mu + g' B_\mu) \quad \text{mit Masse } m_A = 0$$

## Higgs-Boson

- Hinzunahme von realem Feld  $h(x)$

$$\Phi = \frac{1}{2} \begin{pmatrix} 0 \\ v + h(x) \end{pmatrix}$$

- Änderung des Potentialminimums:

$$v = \sqrt{\frac{\mu^2}{\lambda}}$$

- Erhalte drei Kopplungen:

$$\mathcal{L}_V = -\mu^2 h^2 - \lambda v h^3 - \frac{1}{4} \lambda h^4 \text{ mit Masse } m_h = \sqrt{2}\mu = \sqrt{2\lambda}v$$

$$\mathcal{L}_B = \frac{1}{2} (\partial_\mu h)^2 + \left[ m_W^2 W^{+\mu} W^-_\mu + \frac{1}{2} m_Z^2 Z^\mu Z_\mu \right] \cdot \left( 1 + \frac{h}{v} \right)^2$$

$$\mathcal{L}_F = -m_f \bar{f} f \left( 1 + \frac{h}{v} \right)$$

■ Peter Higgs

- Geboren: 29. Mai 1929 (Newcastle)
- Ph.D. 1954 am King's College in London
- Professor an der University of Edinburgh

■ Francois Englert

- Geboren: 6. November 1932 (Etterbeek)
- Ph.D. 1959 am Universite de Bruxelles
- Später dort Professor



**Abbildung:** Photo von Herrn Englert und Herrn Higgs am 4. Juli 2012 am CERN [2].

## Einordnung in die Geschichte der Teilchenphysik

### Theorie

#### **Experimentelle Suche**

Erzeugung und Zerfall des Higgs-Bosons

SPS

LEP

Tevatron

LHC

### Entdeckung

Seit 2012

## Erzeugung des Higgs-Bosons

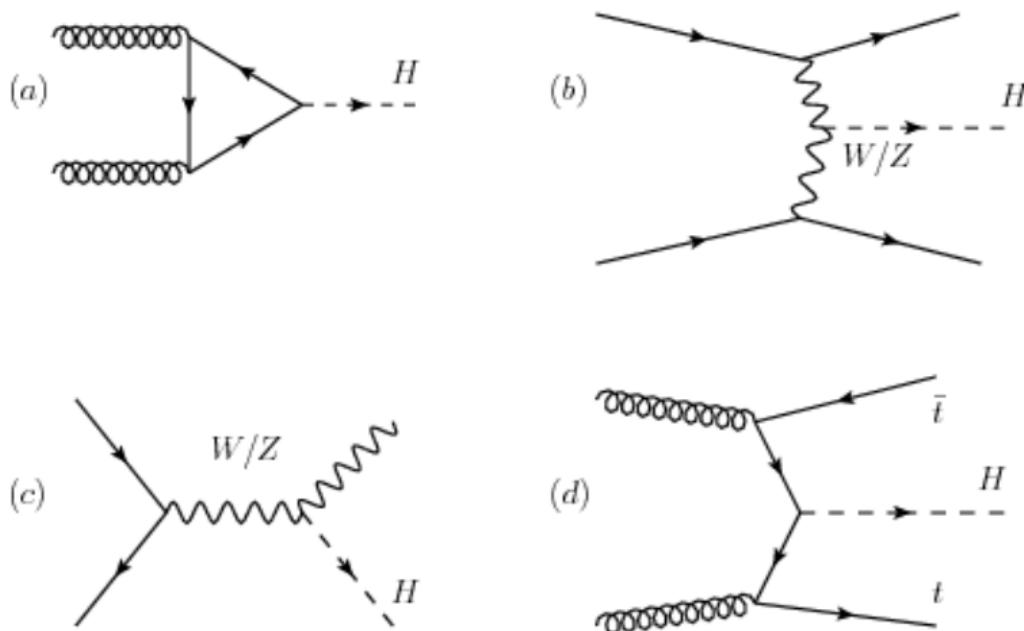


Abbildung: Produktionskänele des Higgs im Standardmodell [3].

Experimentelle Suche: Erzeugung und Zerfall des Higgs-Bosons

## Zerfall des Higgs-Bosons

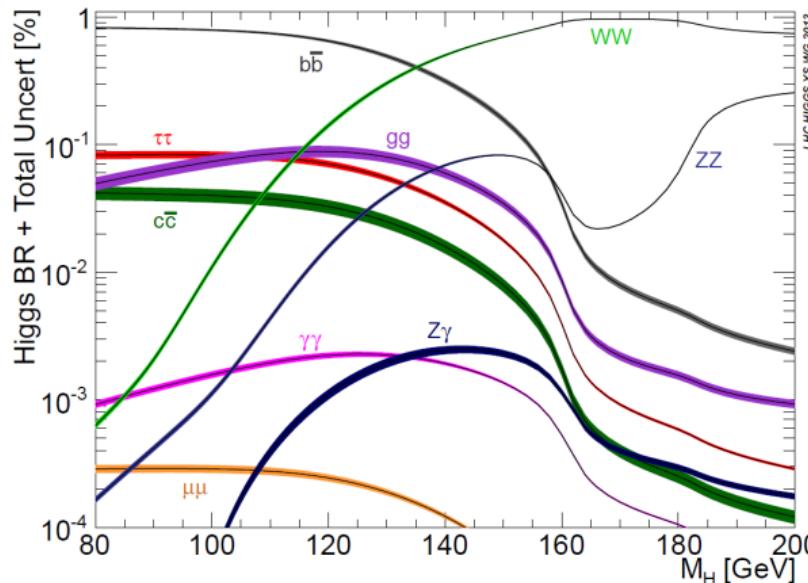


Abbildung: Zerfallswahrscheinlichkeiten als Graphik mit einzelnen Zerfällen [4].

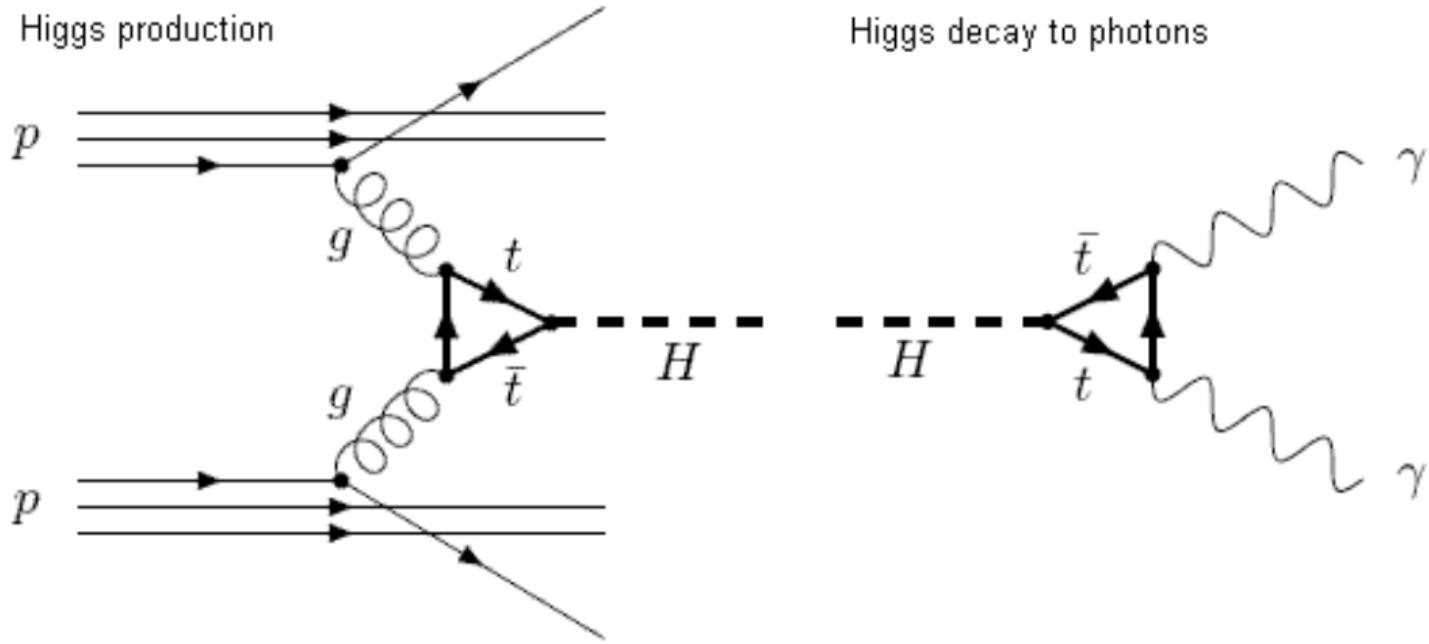


Abbildung: ggF mit assoziiertem Higgs-Boson und diphotonischem Zerfall [5].

## Suche am SPS mit NA31 [6]

- Vorgänger von NA48
- Messungen von 1987 bis 1989
- Eigentliche Aufgabe:
  - Suche nach CP-Verletzung im Kaonsektor  
⇒ Daten wurden auch zur Higgs-Suche verwendet
  - Suche in neutralem Kaonzerfall:  
⇒  $K_L^0 \rightarrow \pi^0 H^0$  mit  $H^0 \rightarrow e^+ e^-$
  - Untergrund sollte gleiche Signatur haben:  
⇒  $K_L^0 \rightarrow \pi^0 \pi^0$  mit  $\pi^0 \rightarrow e^+ e^- \gamma$   
⇒  $K_L^0 \rightarrow \pi^0 \pi^+ \pi^-$  mit  $\pi^\pm \rightarrow e^\pm \nu_e$   
⇒ Ausschluss durch invariante Massen
  - Gemessene unteres Limit:  $m_H = 15$  MeV

## Suche am LEP

- LEP-Laufzeit von 1989 bis 2000
- Produktion über Higgs-Strahlung:  $e^+e^- \rightarrow Hz^0$
- Suche in
  - "4-Jet-Kanal":  $HZ^0 \rightarrow b\bar{b} + q\bar{q}$
  - "Missing-Energy-Kanal":  $HZ^0 \rightarrow b\bar{b} + \nu\bar{\nu}$
  - "leptonischem Kanal":  $HZ^0 \rightarrow b\bar{b} + e^+e^-$
- Im Jahr 2000:
  - Signalüberschuss  $\Rightarrow$  vier Wochen Laufzeitverlängerung
  - DELPHI, L3 und Opal konnten nichts messen
  - Einschränkung auf  $m_H > 114,4 \text{ GeV}$

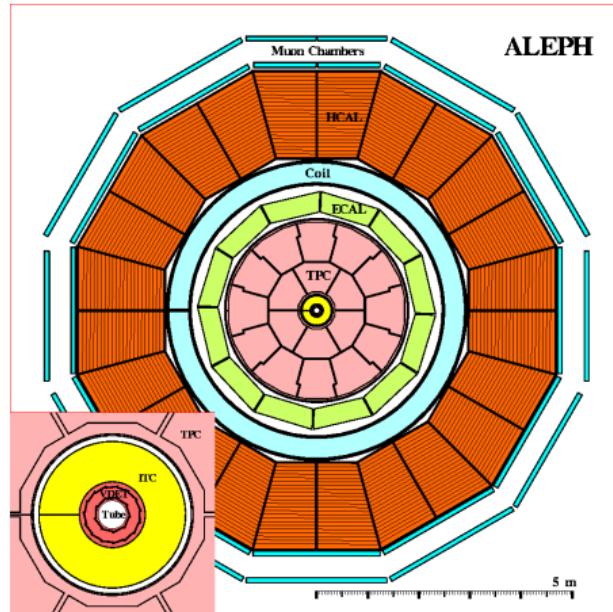


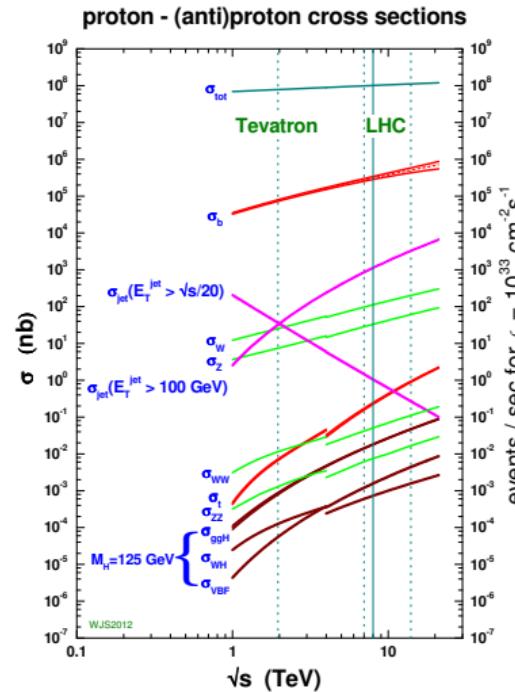
Abbildung: Querschnitt des ALEPH und Beschriftung der Bestandteile [7].

Experimentelle Suche: LEP

- In den 1990ern:

- Studien über Erzeugung eines Higgs in  $p\bar{p}$ -Kollisionen
- Kein theoretisches  $m_H$   $\Rightarrow$  viele Einschränkungen nötig
- Jeder Zerfallskanal simuliert und untersucht
- Wichtigste Zerfallskanäle für Detektorentwicklung herangezogen:
  - $H \rightarrow \gamma\gamma$
  - $H \rightarrow ZZ \rightarrow l^+l^-l^+l^-$

$\Rightarrow$  Planung und Konstruktion des LHC

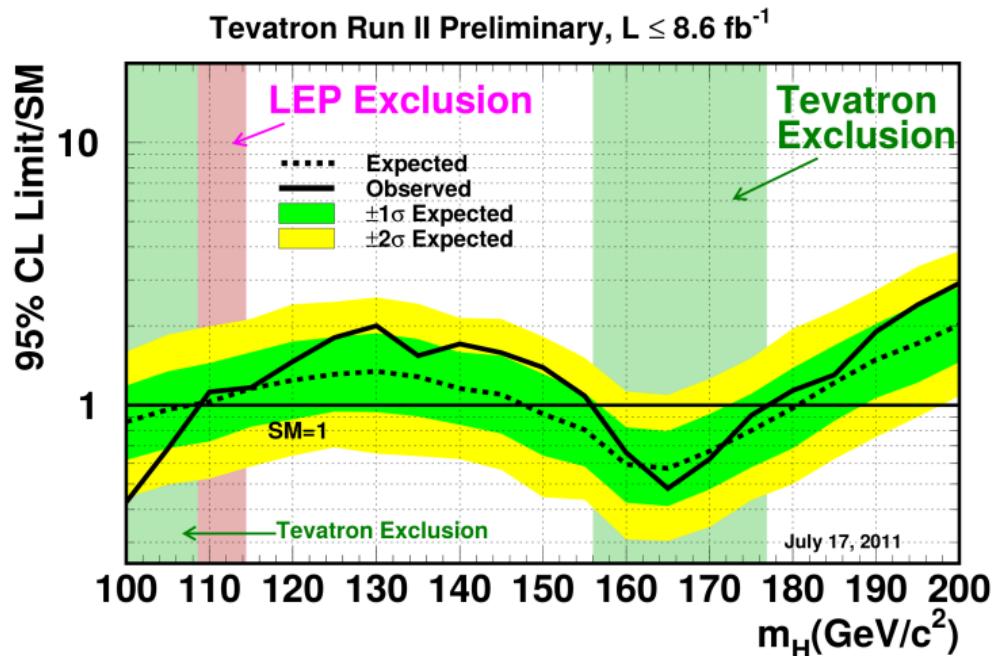


## Suche am Tevatron durch D0 und CDF

- $p\bar{p}$ -Collider
- Daten von März 2001 bis September 2011
- Gesucht wurde
  - Getrennte Suche nach Limits:
    - "low mass"  $m_H < 135 \text{ GeV}$   
 $\Rightarrow$ Higgs-Strahlung  $H \rightarrow b\bar{b}$
    - "high mass"  $m_H > 135 \text{ GeV}$   
 $\Rightarrow$ gg-Fusion mit  $H \rightarrow WW$
  - Ausgeschlossene Massengebiete:
    - $100 \text{ GeV} \leq m_H \leq 108 \text{ GeV}$
    - $156 \text{ GeV} \leq m_H \leq 177 \text{ GeV}$



**Abbildung:** Bild des Tevatron Colliders mit Standorten der D0- und CDF-Experimente [9].



**Abbildung:** Abweichungen zwischen gemessener und vorhergesagter Higgs-Masse mit Ausschlussbereichen vom LEP und Tevatron [10].

## Suche am LHC mit ATLAS und CMS

- Start 10. September 2008
  - 20. September: Fehlstelle zwischen Magneten
  - Reparaturen dauerten über ein Jahr
  - Zeigten weitere Schwächen auf  
⇒Start 2010 mit  $\sqrt{s} = 7 \text{ TeV}$
- 2010: Gründung der "LHC Higgs Cross-Section Working Group"  
→Jährliche Veröffentlichung im Yellow Report [11]
- Sommer 2011: Ausschlag bei  $m_H = 140 \text{ GeV}$ 
  - Zuerst in  $H \rightarrow WW$  später in  $H \rightarrow \gamma\gamma$
  - Weitere Daten widerlegten Erwartung
- Ende 2011: Nach Analyse von  $5,1 \text{ fb}^{-1}$  bei  $\sqrt{s} = 7 \text{ TeV}$ 
  - Higgs-Masse ausgeschlossen bis auf  $115,5 \leq m_H \leq 131 \text{ GeV}$
  - Signifikanz von  $3\sigma$
  - Vor allem in  $H \rightarrow \gamma\gamma$  und  $H \rightarrow 4l$

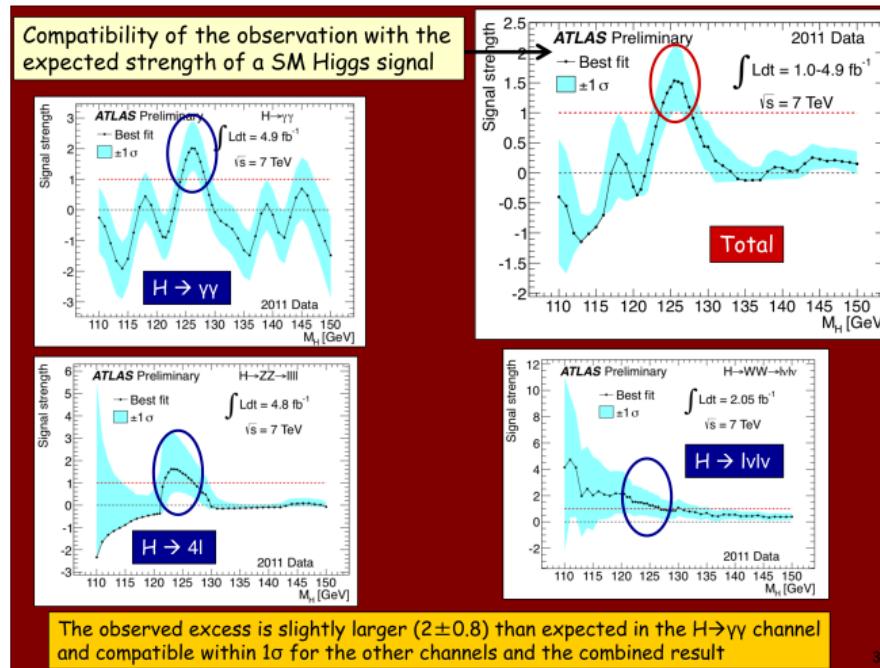


Abbildung: Ausschnitt des CERN Public Seminars der ATLAS Gruppe [12]

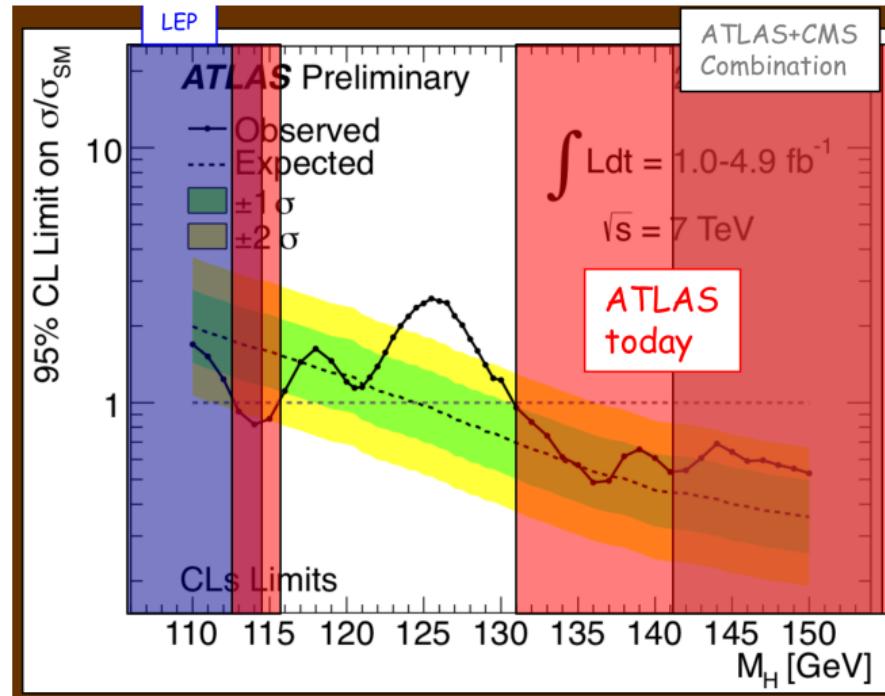


Abbildung: Ausschnitt des CERN Public Seminars der ATLAS Gruppe [12].

Einordnung in die Geschichte der Teilchenphysik

Theorie

Experimentelle Suche

**Entdeckung**

Analyse am ATLAS  
Analyse am CMS

Seit 2012

## Kurzübersicht

- 2012:

- $\sqrt{s}$  von 7 TeV auf 8 TeV
- Höhere Higgs-Produktion
- Aufnahme von 5,1 fb Daten
- Genauere Betrachtung von 125 GeV

- 4. Juli 2012:

- Gemeinsame Pressekonferenz von ATLAS und CMS
- Beide präsentierten Ausschlag über  $5\sigma$  bei:
  - ATLAS:  $m_H = 126.0 \pm 0.4(\text{stat}) \pm 0.4(\text{sys})\text{GeV}$
  - CMS:  $m_H = 125.3 \pm 0.4(\text{stat.}) \pm 0.5(\text{syst.})\text{GeV}$
- Rolf Heuer: "I think we have it."

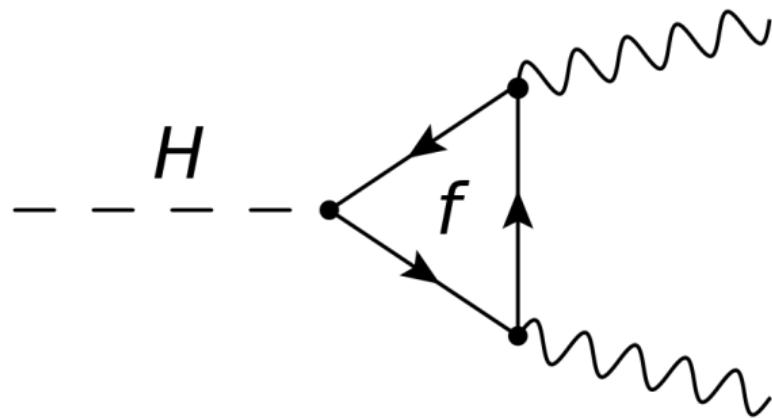
## Analyse am ATLAS

- Untersuchte Kanäle bei 8 TeV:
  - $H \rightarrow ZZ^{(*)} \rightarrow 4l$
  - $H \rightarrow \gamma\gamma$
  - $H \rightarrow WW^{(*)} \rightarrow e\nu\mu\nu$
- Ausschlussgebiet für  $m_H$ :
- Optimierte Analysen für Elektronen und Photonen:
  - Rekonstruktion
  - Identifikation
  - Isolation

⇒ Kanäle robuster gegenüber Pile-up

**H → γγ**

- Verwendung der beiden  $\gamma$  mit höchstem  $p_T$
- Sensitiv von 110 GeV bis 150 GeV
- Größte Untergründe:
  - SM Diphoton-Untergründe  
(Bsp.  $Z \rightarrow \gamma\gamma$ ,  $\pi^0 \rightarrow \gamma\gamma$ )
  - Als Photonen ident.  $\gamma + \text{jets}$ ,  $\text{jet} + \text{jet}$  Ereignisse
- Rekonstruktion durch Kalorimeter- und Spurkammereinträge  
⇒ Konvertierte- / Unkonvertierte-Photonen



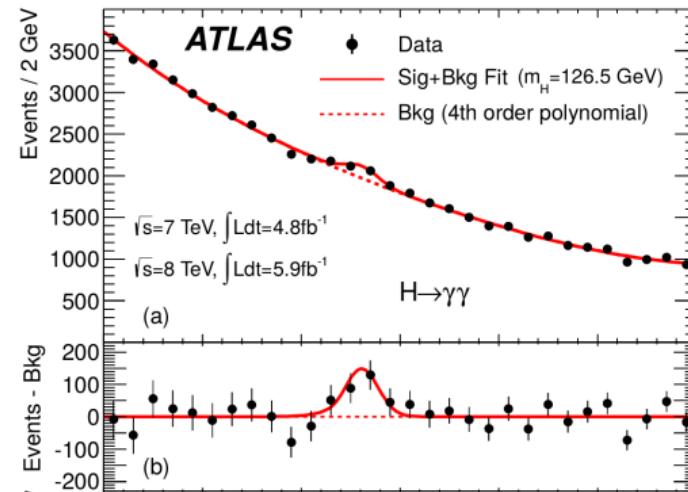
**Abbildung:** Feynman-Diagramm eines diphotonischen Zerfalls eines Higgsbosons [13].

## Zusätzliche Analyseoptimierung

- Zwei Jet Events für VBF-Sensitivität
- Aufteilung der Photonen in
  - zwei unkonvertierte  $\gamma$ 
    - central / rest  
 $\rightarrow \text{low } p_T < 60 \text{ GeV} < \text{high } p_T$
  - ein konvertiertes  $\gamma$ 
    - central / rest  
 $\rightarrow \text{low } p_T < 60 \text{ GeV} < \text{high } p_T$
    - transition

## Massenrekonstruktion

- Invariante Masse der  $\gamma$  aus:
  - Energieeinträge aus ECAL  $E$
  - $\eta$  des primären Vertex und des  $\gamma$  im ECAL
  - Azimuthwinkel  $\phi$  zwischen  $E$  und  $\eta$
  - Form der Massenverteilung für durch
    - Signal: Crystal Ball Function
    - Untergrund: 4. Grad Bernsteinpolynom



**Abbildung:** Verteilungen des Untergrundes und Signals, sowie deren Verhältnis, ungewichtet (a) & (b) und gewichtet (c) & (d) [14].

## Analyse am CMS

- Untersuchte Kanäle bei 8 TeV:

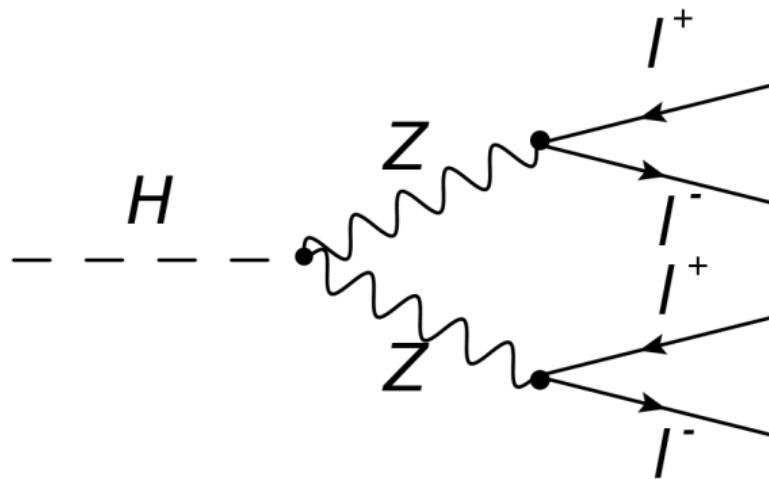
- $H \rightarrow \gamma\gamma$
- $H \rightarrow ZZ \rightarrow 4l$
- $H \rightarrow W^+W^- \rightarrow 2l2\nu$
- $H \rightarrow \tau^+\tau^-$
- $H \rightarrow b\bar{b} \rightarrow 2\text{Jets}$

- Optimierte Analysen für Leptonen:

- Identifikation
- Isolation

**H → ZZ → 4l**

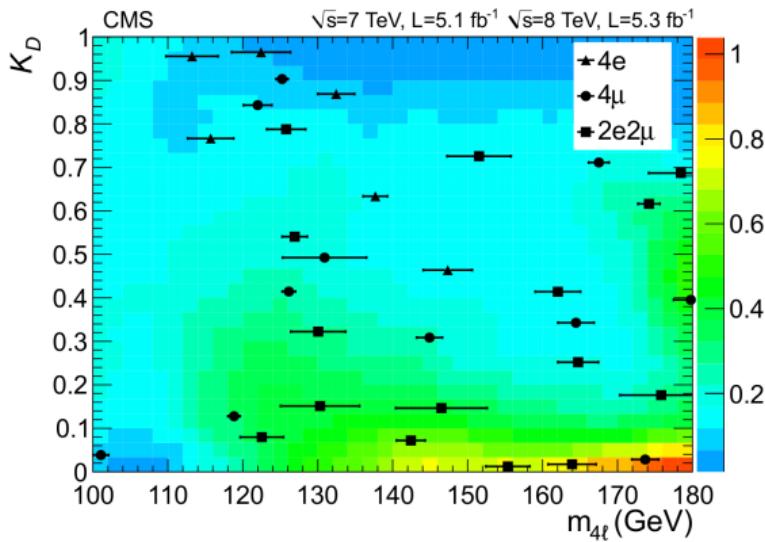
- Sensitiv von 110 GeV bis 160 GeV
- Betrachtete Unterkanäle:
  - ZZ → 4e
  - ZZ → 4μ
  - ZZ → 2e2μ
- μ und e müssen isoliert auftreten
- Leptonenpaare aus selben primären Vertex
- Größte Untergründe:
  - ZZ → 4l aus  $q\bar{q}$ -Produktion
  - Z/W+Jets
  - Als Leptonen identifizierte  $\gamma$



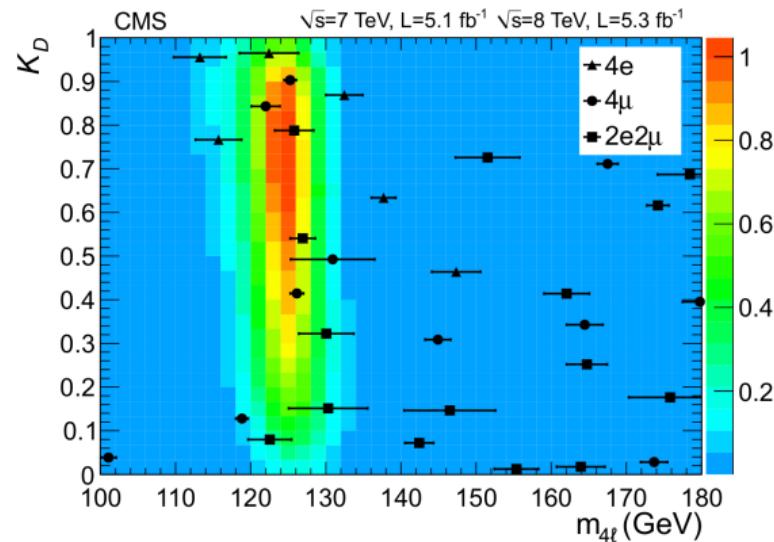
**Abbildung:** Zerfall des Higgs-Bosons in zwei Z-Bosonen und anschließend in je zwei Leptonen als Feynman-Diagramm [15].

## Analyse

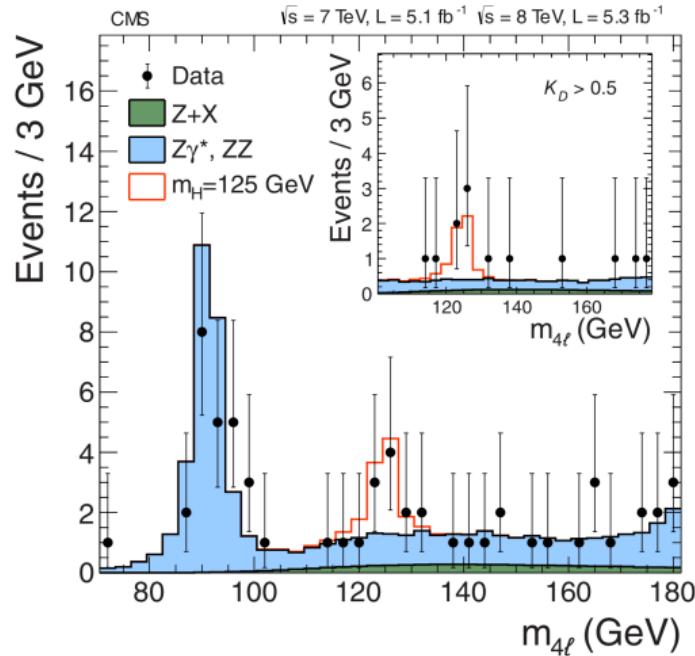
- Problem: FSR (final state radiation) geht verloren
- Lösungen:
  - Suche  $\gamma$  aus Bremsstrahlung
  - Berechnung der invarianten Masse am Vertex  
 $\rightarrow m_{ll} < m_{ll}\gamma \approx m_Z$  ?
- Zwei Leptonenpaare SF (same flavour) und OC (opposite charge)
- Untergrundvorhersage auf Ausschlussbereich für  $m_H$  optimiert  
 $\rightarrow$  Gelockerte Isolations-/Identifikationskriterien
- Kinematische Diskriminante:  $K_D = \mathcal{P}_{\text{Sig}} / (\mathcal{P}_{\text{Sig}} + \mathcal{P}_{\text{Bkg}})$
- Drei Unterkanäle, zwei Datensätze (7 TeV und 8 TeV)  
 $\rightarrow$  Sechs unabhängige 2D-Maximum Likelihood Fits für  $m_{4l}$  und  $K_D$



**Abbildung:** 2D Farbplots der Diskriminante  $K_D$  gegen die invariante Masse  $m_{4\ell}$  für den Untergund [16].



**Abbildung:** 2D Farbplots der Diskriminante  $K_D$  gegen die invariante Masse  $m_{4\ell}$  für Untergrund und Signal [16].



**Abbildung:** Verteilung der invarianten Masse aus vier Leptonen mit Untergrund und Erwartung bei  $m_H = 125$  GeV [16].

## Kombinierte Analyse

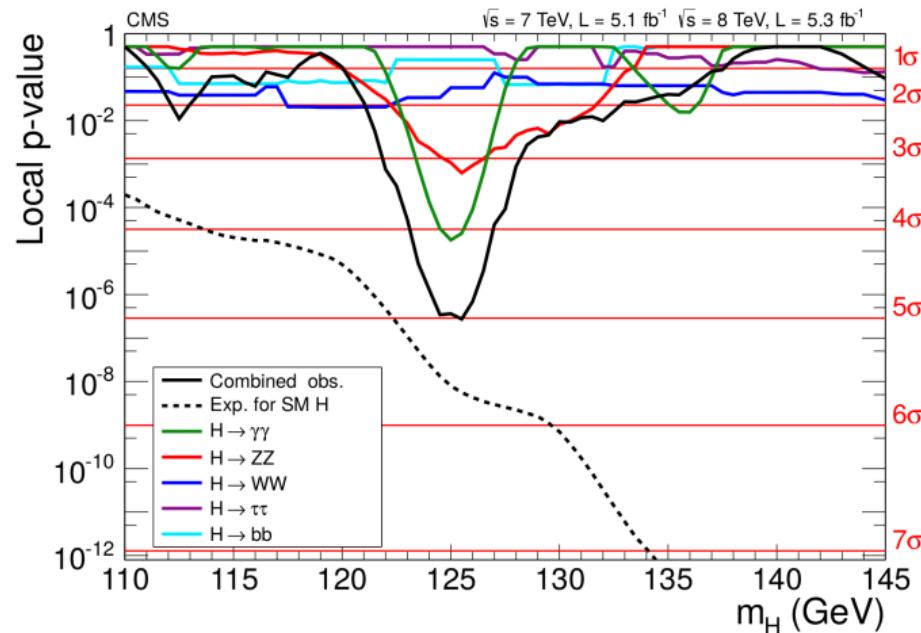


Abbildung: Kombinierte Betrachtung der Untergrundfluktuation (p-value) [16].

Entdeckung: Analyse am CMS

Einordnung in die Geschichte der Teilchenphysik

Theorie

Experimentelle Suche

Entdeckung

**Seit 2012**

## Seit 2012

- Umstellung von Suche auf Messung
- Spin- und Paritätsmessungen des Higgs ( $J^P = 0^+$ ) [17]  
→ Landau-Yang-Theorem:  $H \rightarrow \gamma\gamma$
- Messungen der Kopplungen
- Suche nach:
  - BSM-Zerfällen
  - verbotenen SM-Zerfällen
- 2013: Nobelpreis für F. Englert und P. Higgs

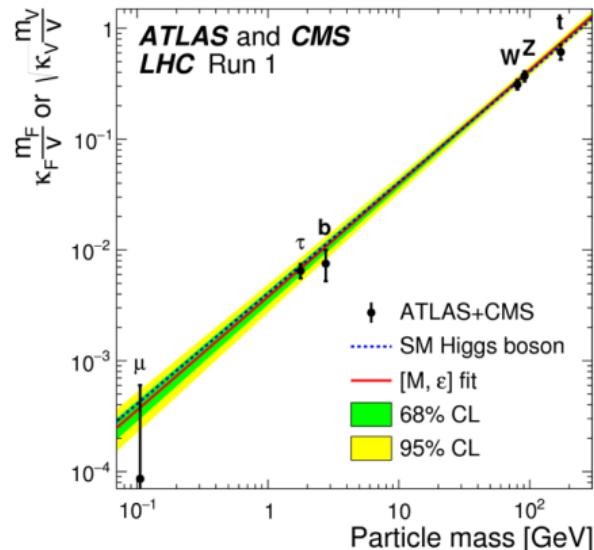
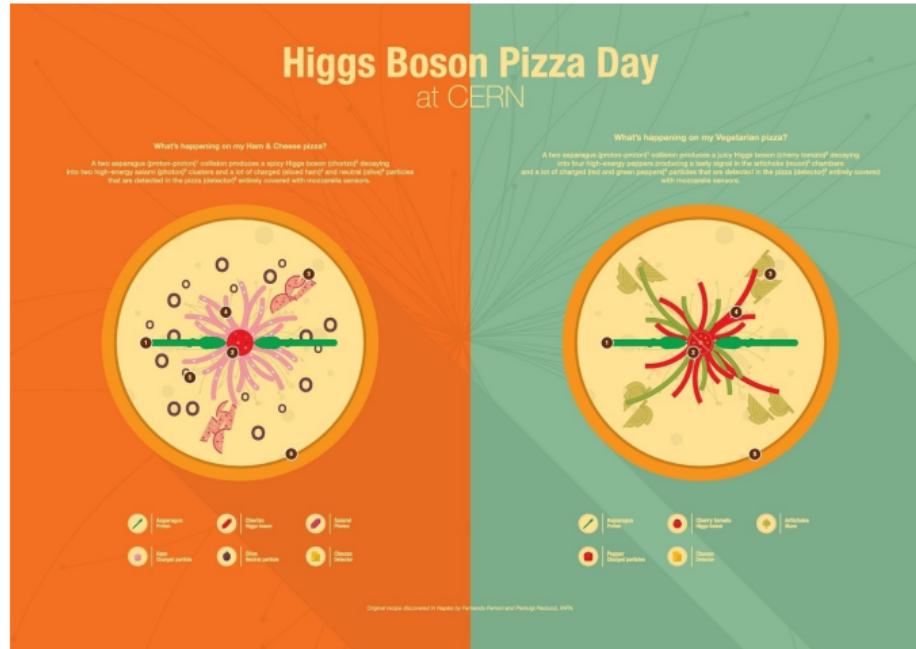


Abbildung: Kopplung an das Higgs aufgetragen gegen Teilchenmasse [18].

## Zusammenfassung

- Higgs-Mechanismus essentiell für Massen im SM
- Higgs-Boson war letztes fehlendes Teil des SM
- Suche über 20 Jahre lang an verschiedenen Beschleunigern/Experimenten  
→Masseneingrenzung
- Hat Detektorbau vorangetrieben
- Entdeckung 4. Juli 2012 am LHC durch verschiedene Zerfälle
- Mögliches Fenster zur BSM-Physik



**Abbildung:** Anleitung für die jährlich am 4. Juli am CERN erhältliche Higgs-Boson-Pizza [19].

-  Mexican Hat Potential. URL:  
<https://cds.cern.ch/record/2012465/files/higgspotential.png>.
-  F. Englert und P. Higgs. URL: [https://mediaarchive.cern.ch/MediaArchive/Photo/Public/2012/1207136/1207136\\_101/1207136\\_101-A4-at-144-dpi.jpg](https://mediaarchive.cern.ch/MediaArchive/Photo/Public/2012/1207136/1207136_101/1207136_101-A4-at-144-dpi.jpg).
-  Produktionskanäle des Higgs-Bosons. URL:  
<http://inspirehep.net/record/1204788/files/h-prod.png>.
-  Zerfallskanäle des Higgs-Bosons. URL:  
<http://hep.wits.ac.za/images/higgsphys/higgsBranchB.png>.
-  ggF-Produktion und diphotonischer Zerfall eines Higgs. URL:  
<https://e-publishing.cern.ch/index.php/CYR>.
-  Barr et al. “Search for a neutral Higgs particle in the decay sequence  $K_L^0 \rightarrow \pi^0 H^0$  and  $H^0 \rightarrow e^+e^-$ ”. In: Phys. Lett. B 235.CERN-EP-89-156 (Nov. 1989), 356–362. 12 p. URL:  
<https://cds.cern.ch/record/203195>.
-  ALEPH. URL: [http://physik.uibk.ac.at/hephy/maturanten/higgs/dc\\_detector.gif](http://physik.uibk.ac.at/hephy/maturanten/higgs/dc_detector.gif).

-  pp Wirkungsquerschnitte. URL:  
<https://twiki.cern.ch/twiki/bin/view/LHCPhysics/CrossSections>.
-  Tevatron. URL: <https://phys.org/news/2018-09-symmetry-fundamental.html>.
-  TEVNPH Working Group. “Combined CDF and D0 Upper Limits on Standard Model Higgs Boson Production with up to  $8.6 \text{ fb}^{-1}$  of Data”. In: 2011. arXiv: 1107.5518. URL:  
[http://lss.fnal.gov/cgi-bin/find\\_paper.pl?conf-11-354](http://lss.fnal.gov/cgi-bin/find_paper.pl?conf-11-354).
-  Yellow Report. URL: <https://e-publishing.cern.ch/index.php/CYR>.
-  ATLAS. URL: <https://indico.cern.ch/event/164890/contributions/248518/attachments/198416/278553/ATLAS-Higgs.pdf>.
-  Feynmann:  $H \rightarrow \gamma\gamma$ . URL:  
[https://de.wikipedia.org/wiki/Higgs-Boson#/media/File:Higgs\\_to\\_2photons.png](https://de.wikipedia.org/wiki/Higgs-Boson#/media/File:Higgs_to_2photons.png).

-  Georges Aad et al. "Observation of a new particle in the search for the Standard Model Higgs boson with the ATLAS detector at the LHC". In: Phys. Lett. B716 (2012), S. 1–29. DOI: [10.1016/j.physletb.2012.08.020](https://doi.org/10.1016/j.physletb.2012.08.020). arXiv: [1207.7214 \[hep-ex\]](https://arxiv.org/abs/1207.7214).
-  Feynmann:  $H \rightarrow ZZ \rightarrow 4l$ . URL:  
[https://de.wikipedia.org/wiki/Higgs-Boson#/media/File:Higgs\\_to\\_4leptons.png](https://de.wikipedia.org/wiki/Higgs-Boson#/media/File:Higgs_to_4leptons.png).
-  Serguei Chatrchyan et al. "Observation of a new boson at a mass of 125 GeV with the CMS experiment at the LHC". In: Phys. Lett. B716 (2012), S. 30–61. DOI: [10.1016/j.physletb.2012.08.021](https://doi.org/10.1016/j.physletb.2012.08.021). arXiv: [1207.7235 \[hep-ex\]](https://arxiv.org/abs/1207.7235).
-  ATLAS Collaboration. "Evidence for the spin-0 nature of the Higgs boson using ATLAS data". In: Physics Letters B 726.1 (2013), S. 120–144. ISSN: 0370-2693. DOI:  
<https://doi.org/10.1016/j.physletb.2013.08.026>. URL:  
<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0370269313006527>.
-  Kopplungen an das Higgs-Boson. URL: <https://cds.cern.ch/images/ATLAS-PHOTO-2018-020-1>.
-  Higgs Boson Pizza. URL:  
<https://home.cern/news/news/physics/make-your-own-higgs-boson-pizza>.