

Die Entdeckung des Higgs

Schlüsselexperimente der Teilchenphysik

David Maximilian Immig

22. Januar 2016

- 1 Einführung
- 2 Was verleiht den Elementarteilchen ihre Masse?
- 3 Experimente auf der Suche nach dem Higgs-Boson
- 4 Experimenteller Nachweis

- 1 Einführung
- 2 Was verleiht den Elementarteilchen ihre Masse?
- 3 Experimente auf der Suche nach dem Higgs-Boson
- 4 Experimenteller Nachweis

- 1 Einführung
- 2 Was verleiht den Elementarteilchen ihre Masse?
- 3 Experimente auf der Suche nach dem Higgs-Boson
- 4 Experimenteller Nachweis

- 1 Einführung
- 2 Was verleiht den Elementarteilchen ihre Masse?
- 3 Experimente auf der Suche nach dem Higgs-Boson
- 4 Experimenteller Nachweis

Standardmodell

Drei Generationen der Materie (Fermionen)

	I	II	III		
Masse	2,3 MeV	1,275 GeV	173,07 GeV	0	125,9 GeV
Ladung	$\frac{2}{3}$	$\frac{2}{3}$	$\frac{2}{3}$	0	0
Spin	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	1	0
Name	u up	c charm	t top	γ Photon	H Higgs Boson
Quarks	4,8 MeV	95 MeV	4,18 GeV	0	
	$-\frac{1}{3}$	$-\frac{1}{3}$	$-\frac{1}{3}$	0	
	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	1	
	d down	s strange	b bottom	g Gluon	
Leptonen	<2 eV	<0,19 MeV	<18,2 MeV	91,2 GeV	
	0	0	0	0	
	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	1	
	ν_e Elektron-Neutrino	ν_μ Myon-Neutrino	ν_τ Tau-Neutrino	Z^0 Z Boson	
	0,511 MeV	105,7 MeV	1,777 GeV	80,4 GeV	
	-1	-1	$-\frac{1}{2}$	± 2	
	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	1	
	e Elektron	μ Myon	τ Tau	$W^\pm$ W Boson	

Standardmodell [16]

Lagrangedichte $\mathcal{L}$

Beschreibt die Teilchen, WW. und Felder im Standardmodell.

Bedingung: $\mathcal{L} = \mathcal{L}'$ (Eichinvarianz)

- symmetrische Naturgesetze (Noether-Theorem)
- durch hinzufügen eines Massenterms gilt unter Transformation $\mathcal{L} \neq \mathcal{L}'$
- ⇒ symmetrische Welt erlaubt nur masselose Teilchen
- ⇒ Im Widerspruch mit der experimentell beobachteten Welt

Standardmodell

Drei Generationen der Materie (Fermionen)

	I	II	III		
Masse	2,3 MeV	1,275 GeV	173,07 GeV	0	125,9 GeV
Ladung	$\frac{2}{3}$	$\frac{2}{3}$	$\frac{2}{3}$	0	0
Spin	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	1	0
Name	u up	c charm	t top	γ Photon	H Higgs Boson
Quarks	4,8 MeV	95 MeV	4,18 GeV	0	
	$-\frac{1}{3}$	$-\frac{1}{3}$	$-\frac{1}{3}$	0	
	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	1	
	d down	s strange	b bottom	g Gluon	
Leptonen	<2 eV	<0,19 MeV	<18,2 MeV	91,2 GeV	
	0	0	0	0	
	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	1	
	ν_e Elektron-Neutrino	ν_μ Myon-Neutrino	ν_τ Tau-Neutrino	Z⁰ Z Boson	
	0,511 MeV	105,7 MeV	1,777 GeV	80,4 GeV	
	-1	-1	-1	±1	
	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	1	
	e Elektron	μ Myon	τ Tau	W[±] W Boson	

Standardmodell [16]

Lagrangedichte $\mathcal{L}$

Beschreibt die Teilchen, WW. und Felder im Standardmodell.

Bedingung: $\mathcal{L} = \mathcal{L}'$ (Eichinvarianz)

- symmetrische Naturgesetze (Noether-Theorem)
 - durch hinzufügen eines Massenterms gilt unter Transformation $\mathcal{L} \neq \mathcal{L}'$
- ⇒ symmetrische Welt erlaubt nur masselose Teilchen
- ⇒ Im Widerspruch mit der experimentell beobachteten Welt

Standardmodel - Elektroschwache Wechselwirkung (ESW)

- 1. vereinheitlichte QFT aus QED und schwacher WW.
- ⇒ Sheldon Glashow, Abdus Salam und Steven Weinberg (1967)

1 4 masselose Eichbosonen: B^0 , W^0 , W^1 , W^2

2 Spontane Symmetriebrechung führt massiven Bosonen

$$|\gamma\rangle = \cos\theta_W |B^0\rangle + \sin\theta_W |W^0\rangle$$

$$|Z^0\rangle = -\sin\theta_W |B^0\rangle + \cos\theta_W |W^0\rangle$$

$$|W^\pm\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}}(|W^1\rangle \mp i|W^2\rangle)$$

θ_W : Weinbergwinkel

Goldstonetheorem

Goldstone-Theorem

Wird eine **kontinuierliche** und **globale** Symmetrie spontan gebrochen, so tritt in der effektiven Theorie ein masseloses pseudoskalares Teilchen auf.

$\Rightarrow$ (*Nambu*–) *Goldstone* – *Boson*

$\Rightarrow$ nicht beobachtbar

■ Phillip Anderson (1962)

$\Rightarrow$ Versuch Goldstones Theorem zu umgehen

$\Rightarrow$ Spontane Symmetriebrechung führt zu Masse von Eichfeldern

Baron François Englert & Robert Brout



Francois Englert, Robert Brout [19, 20]

- François Englert:

⇒ *1932

- Robert Brout:

⇒ *1928, †2011

- Université Libre de Bruxelles

- "Broken symmetry and the mass of the gauge vector mesons"

⇒ 26. Juni 1964

Peter Ware Higgs

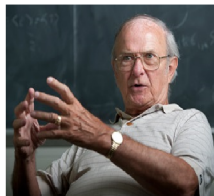


Peter Higgs [18]

- *1929
- University of Edinburgh
- "Broken symmetries and the masses of gauge bosons"
- ⇒ 31. August 1964
- "Spontaneous symmetry breakdown without massless bosons"
- ⇒ 27. Dezember 1965

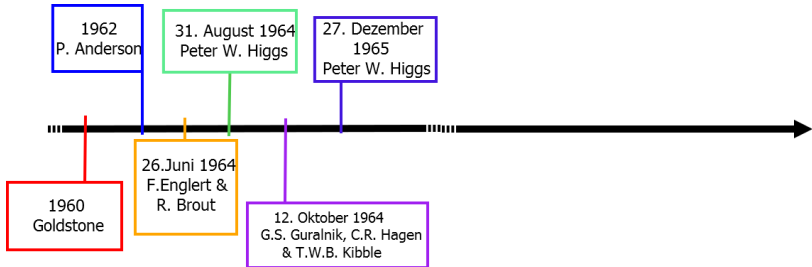
Gerald Guralnik, C.R. Hagen & T.W.B. Kibble

- Gerald Stanford Guralnik: *1936, †2014
 - Carl Richard Hagen: *1937
 - Sir Thomas Walter Bannerman Kibble: *1932
 - "Global conservation laws and massless particles"
- ⇒ 12. Oktober 1964, Imperial College, London



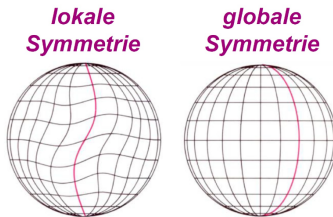
Guralnik, Hagen & Kibble [21,22,23]

Was verleiht den Elementarteilchen ihre Masse?



Symmetrien & Symmetriebrechung

- Kontinuierliche (z.B. Translations-, Rotations- & Zeitinvarianz) und diskrete (z.B. C, P, T) Symmetrien
 - Symmetriebrechung: Übergang eines physikalischen System in einen Zustand geringerer Symmetrie
- ⇒ explizit: $\mathcal{L}$ und Vakuumzustand nicht invariant
- ⇒ spontan: $\mathcal{L}$ invariant und Vakuumzustand nicht

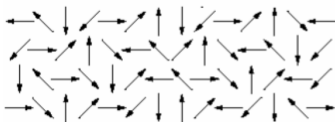


[33]

Symmetrien	
Global	Lokal
Goldstone-Theorem	Higgs-Mechanismus

Analogiebeispiel: Ferromagnetismus

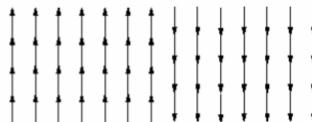
Temperatur hoch



Magnetfeld im Mittel = 0

Rotationssymmetrie

Temperatur niedrig



Magnetfeld im Mittel $\neq 0$

keine Rotationssymmetrie

[32]

Higgs-Mechanismus & -Feld 1

- Higgs-Feld: omnipräsentes Feld
- ⇒ Teilchen "fühlen" seinen Effekt durch Aneignung von Masse
- Higgs-Boson: Anregung des Higgs-Feldes

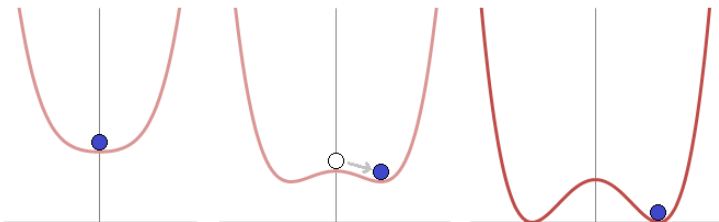
Higgs-Mechanismus

Wird eine Eichsymmetrie spontan gebrochen, so tritt das zugehörige (Nambu-)Goldstone-Boson physikalisch nicht in Erscheinung.

Das Eichfeld wird massiv und absorbiert den entsprechenden Freiheitsgrad.

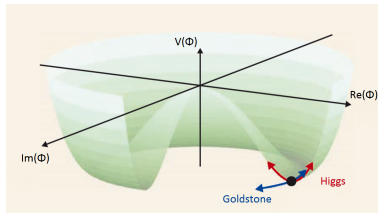
Higgs-Mechanismus & -Feld 2

- 1 hohes Energieniveau, symmetrischer Zustand
 - 2 kleines Energieniveau, instabiler, symmetrischer Zustand
 - 3 stabiler Vakuumzustand mit gebrochener Symmetrie
- ⇒ gewählte Lage ist ausgezeichnet
- Vakuumserwartungswert des Higgs-Feldes $\neq$ Null
- ⇒ Masse der Eichbosonen



Spontane Symmetriebrechung [31]

Higgs-Mechanismus & -Feld 3



Sombrero-Potential [15]

- 4 Goldstonebosonen
- Anregung:
 - 3 werden "geschluckt" von masselosen Eichbosonen (ESW) (entlang des Tals)
 - 1 wird zum massiven Higgs-Boson (senkrecht zum Tal)
- Interaktion mit dem Higgs-Feld $\Rightarrow Z^0, W^\pm$
- Photon interagiert nicht mit Higgs-Feld

Populärwissenschaftliche Interpretation



Higgs-Hintergrundfeld
erfüllt den Raum



Ein **Teilchen**
im Higgs-Feld...

≙ **Teilchen mit
konstantem Impuls**



... Widerstand gegen
Bewegung ...
Trägheit ↔ Masse

[34]

Populärwissenschaftliche Interpretation



Anregung des
Hintergrundfeldes



angeregtes Higgs-Hintergrundfeld
 $\hat{=}$ massives Higgs-Boson

[34]

Das Higgs-Boson

- Anregung des Higgs-Feldes
 - Existenz des Higgs-Bosons:
- ⇒ Beweis für die Existenz des Higgs-Felds

John Ellis, Mary Gaillard, Dimitri Nanopoulos (1976)

"We should perhaps finish with an apology and a caution. We apologize to experimentalists for having no idea what is the mass of the Higgs boson [...]. For these reasons we do not want to encourage big experimental searches for the Higgs boson, but we feel that people performing experiments vulnerable to the Higgs boson should know how it may turn up." [12]

- ⇒ Higgs-Masse (m_H) nicht vorhergesagt
- ⇒ m_H kann nicht leicht sein, da man es sonst schon entdeckt hätte

Das Higgs-Boson

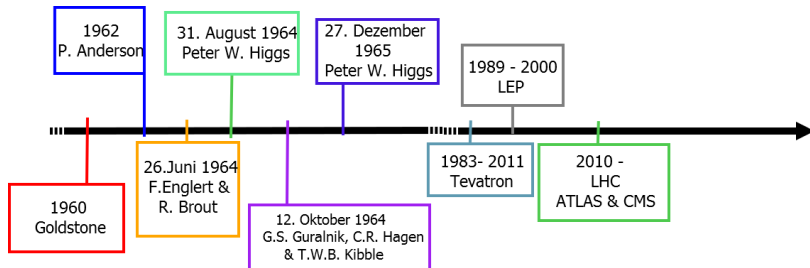
- Anregung des Higgs-Feldes
 - Existenz des Higgs-Bosons:
- ⇒ Beweis für die Existenz des Higgs-Felds

John Ellis, Mary Gaillard, Dimitri Nanopoulos (1976)

"We should perhaps finish with an apology and a caution. We apologize to experimentalists for having no idea what is the mass of the Higgs boson [...]. For these reasons we do not want to encourage big experimental searches for the Higgs boson, but we feel that people performing experiments vulnerable to the Higgs boson should know how it may turn up." [12]

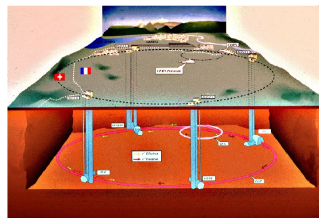
- ⇒ Higgs-Masse (m_H) nicht vorhergesagt
- ⇒ m_H kann nicht leicht sein, da man es sonst schon entdeckt hätte

Experimente auf der Suche nach dem Higgs-Boson



Anfang der Suche nach dem Higgs-Boson

Tevatron	LEP
Fermilab	CERN
1983-2011	1989-2000
$p-\bar{p}$	$e^- - e^+$
1.96 TeV	209 GeV

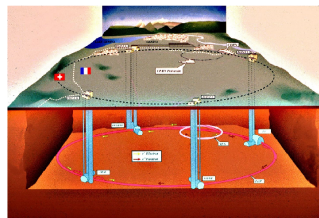


Tevatron, LEP [27,28]

- Zusammen mit LHC-Daten:
- ⇒ Ausgeschlossen:
 $m_H < 600 \text{ GeV}$
- ⇒ Außer:
 $116 \text{ GeV} < m_H < 127 \text{ GeV}$

Anfang der Suche nach dem Higgs-Boson

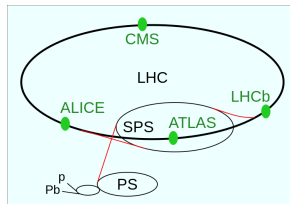
Tevatron	LEP
Fermilab	CERN
1983-2011	1989-2000
$p-\bar{p}$	$e^- - e^+$
1.96 TeV	209 GeV



Tevatron, LEP [27,28]

- Zusammen mit LHC-Daten:
- ⇒ Ausgeschlossen:
 $m_H < 600 \text{ GeV}$
- ⇒ Außer:
 $116 \text{ GeV} < m_H < 127 \text{ GeV}$

Large Hadron Collider (LHC)



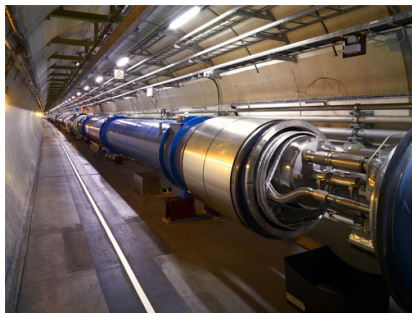
LHC [29]

- Umfang ~ 27 km
- Kollision von Protonen oder Blei-Kernen
- Protonenproduktion: Ionisation von Wasserstoffgas
- 5 Vorbeschleuniger
- in 20 min auf $\sqrt{s} = 7\text{ TeV}$
- $\Rightarrow \sim 99.9999991\%$ der Lichtgeschwindigkeit für Protonen
- $\Rightarrow$ 3. Juni 2015: $\sqrt{s} = 13\text{ TeV}$

Vorbeschleuniger

Linear	Ring
RFQ	SPB
LINAC 2	PS
	SPS

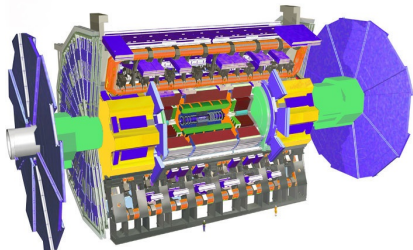
Large Hadron Collider (LHC) 2



Speicherung [35]

- 2 Strahlrohre mit Bewegung der Protonen in entgegengesetzter Richtung
- Speicherring:
 - 1232 Dipolmagneten
 - ⇒ lenkt Teilchen auf Kreisbahn
 - 392 Quadrupolmagneten
 - ⇒ fokussiert Teilchenstrahl
 - 16 Hohlraumresonatoren
 - ⇒ beschleunigt Teilchen

A Toroidal LHC ApparatuS (ATLAS)

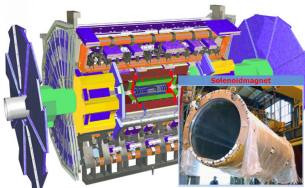
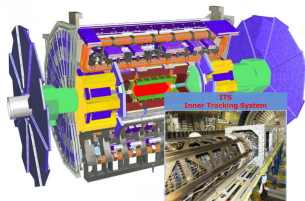


ATLAS-Detektor [17]

- Nachweis von:
- Higgs-Boson
- Supersymmetrischen Teilchen
- CP-Verletzung (B-Physik)

- 1 Innerer Detektor
- 2 Kalorimeter
- 3 Myonensystem

A Toroidal LHC ApparatuS (ATLAS)



ATLAS-Detektor [17]

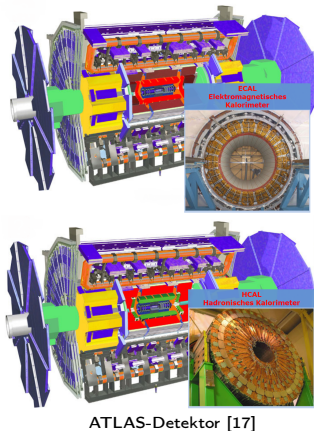
- Nachweis von:
- Higgs-Boson
- Supersymmetrischen Teilchen
- CP-Verletzung (B-Physik)

1 Innerer Detektor

2 Kalorimeter

3 Myonensystem

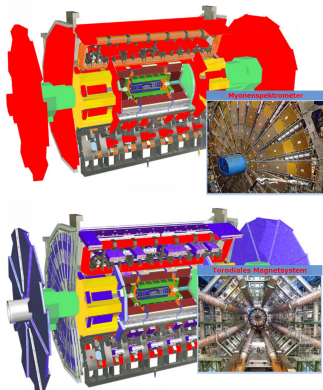
A Toroidal LHC ApparatuS (ATLAS)



- Nachweis von:
- Higgs-Boson
- Supersymmetrischen Teilchen
- CP-Verletzung (B-Physik)

- 1 Innerer Detektor
- 2 Kalorimeter
- 3 Myonensystem

A Toroidal LHC ApparatuS (ATLAS)

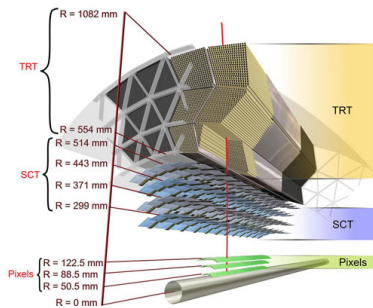


ATLAS-Detektor [17]

- Nachweis von:
 - Higgs-Boson
 - Supersymmetrischen Teilchen
 - CP-Verletzung (B-Physik)

- 1 Innerer Detektor
- 2 Kalorimeter
- 3 Myonensystem

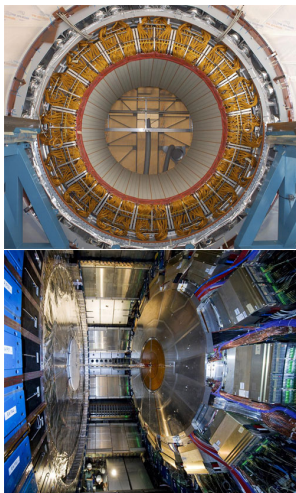
Der Innere Detektor



Aufbau des inneren Detektors [17]

- 1 Silizium Pixeldetektor
 - 2 Silizium Streifen Detektor
- ⇒ Messung von Impuls, Vertexposition & Stoßparameter
- 3 Transition Radiation Tracker:
 - Kombination aus Übergangsstrahlungsdetektor & Driftkammer
 - Identifizierung von Elektronen

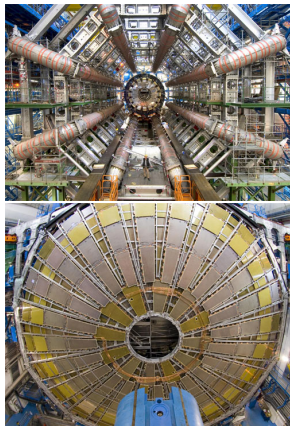
Die Kalorimeter



E.m.- & Hadronisches-Kalorimeter [17]

- misst Energie geladener & neutraler Teilchen
- ⇒ Teilchen interagieren mit Absorber
- ⇒ Detektion von "Teilchenschauern"
- 1** Elektromagnetisches Kalorimeter
 - Absorber (Blei) & Nachweismedium (flüssiges Argon)
- 2** Hadronisches Kalorimeter
 - Absorber (Eisen) & Plastiksintillatoren

Das Myonensystem



Torodiales Luftspulenmagnetsystem (oben), Myonen-Spektrometer (unten) [17]

- Impulsmessung durch Krümmung der Myonenspur

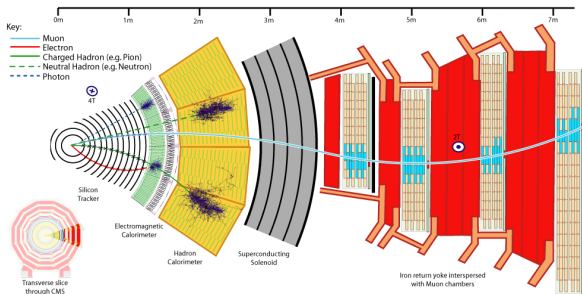
1 Torodiales Luftspulen-Magnetsystem

2 Myonen-Spektrometer:

- 3 MDT(Monitored Drift Tube) - Kammern & Triggereinheiten

⇒ wichtiger Beitrag zum Trigger des gesamten Detektors

Compact-Muon-Solenoid-Experiment (CMS)



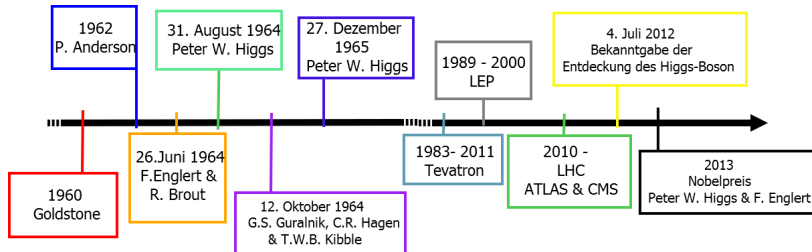
CMS-Detektor [26]

- Entdeckung des Higgs-Boson
- Sucht nach Supersymmetrie
- Untersuchung von Kollision schwerer Ionen

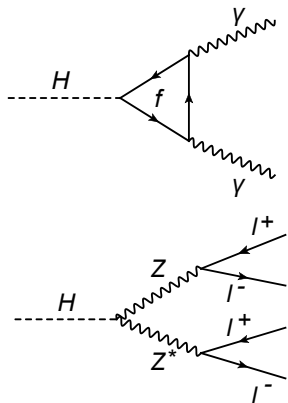
ATLAS vs. CMS

	ATLAS	CMS
ITS	Transition Radiation Tracker 2T Magnetfeld	4T Magnetfeld
ECAL	flüssiges Argon	Wolframat-Kristalle
Myonensystem	Torodiales Luftspulen- Magnetsystem	Eisenjoch

Der Experimentelle Nachweis



Zerfallsprozesse



■ $H \rightarrow \gamma\gamma$

■ $H \rightarrow ZZ^* \rightarrow 4l$

⇒ Bestimmung der Higgs-Masse

■ $H \rightarrow W^+W^- \rightarrow e\nu\mu\nu$

⇒ Bestimmung von Spin & Parität

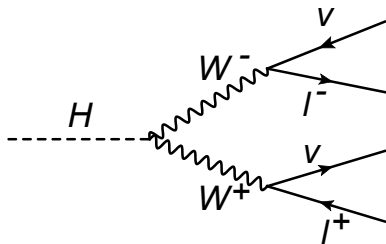
■ $H \rightarrow \tau^+\tau^-$

■ $H \rightarrow b\bar{b}$

⇒ Messung der Kopplungsstärke

l: μ oder e

Zerfallsprozesse



■ $H \rightarrow \gamma\gamma$

■ $H \rightarrow ZZ^* \rightarrow 4l$

⇒ Bestimmung der Higgs-Masse

■ $H \rightarrow W^+W^- \rightarrow e\nu\mu\nu$

⇒ Bestimmung von Spin & Parität

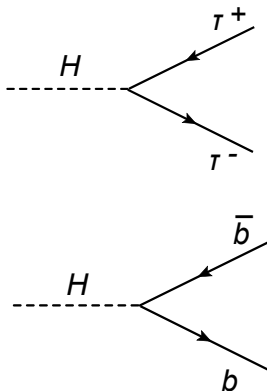
■ $H \rightarrow \tau^+\tau^-$

■ $H \rightarrow b\bar{b}$

⇒ Messung der Kopplungsstärke

l: μ oder e

Zerfallsprozesse



■ $H \rightarrow \gamma\gamma$

■ $H \rightarrow ZZ^* \rightarrow 4l$

⇒ Bestimmung der Higgs-Masse

■ $H \rightarrow W^+W^- \rightarrow e\nu\mu\nu$

⇒ Bestimmung von Spin & Parität

■ $H \rightarrow \tau^+\tau^-$

■ $H \rightarrow b\bar{b}$

⇒ Messung der Kopplungsstärke

l: μ oder e

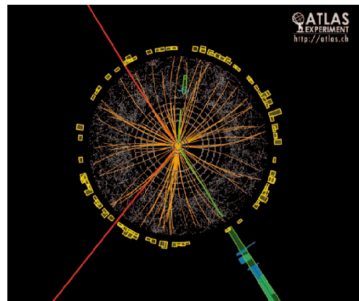
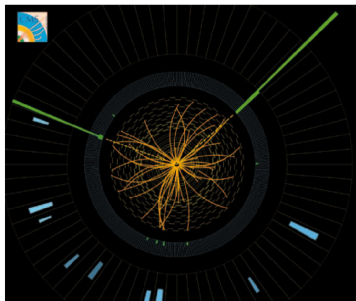
Monte-Carlo-Simulation

- Simulation des Models über Zufallsexperimente
- ⇒ Signal & Untergrund
- Simulation für jeden einzelnen Zerfallskanal
- Annahme: Nichtexistenz des Higgs-Boson

Process	Generator
ggF, VBF	POWHEG [57, 58]+PYTHIA
$WH, ZH, \bar{u}H$	PYTHIA
W +jets, Z/γ^* +jets	ALPGEN [59]+HERWIG
$\bar{t}t, tW, tb$	MC@NLO [60]+HERWIG
tqb	AcerMC [61]+PYTHIA
$q\bar{q} \rightarrow WW$	MC@NLO+HERWIG
$gg \rightarrow WW$	gg2WW [62]+HERWIG
$q\bar{q} \rightarrow ZZ$	POWHEG [63]+PYTHIA
$gg \rightarrow ZZ$	gg2ZZ [64]+HERWIG
WZ	MadGraph+PYTHIA, HERWIG
$W\gamma$ +jets	ALPGEN+HERWIG
$W\gamma^*$ [65]	MadGraph+PYTHIA
$q\bar{q}/gg \rightarrow \gamma\gamma$	SHERPA

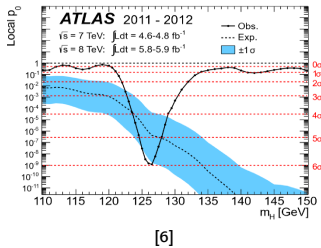
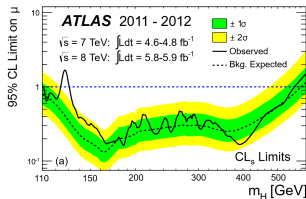
Eventgeneratoren (ATLAS) [6]

Eventdisplays



$H \rightarrow \gamma\gamma$ (links) & $H \rightarrow ZZ \rightarrow 4l$ (rechts) [13]

Higgs-Masse m_H



■ ATLAS: m_H

⇒ $126 \pm 0.4 \text{ (stat.)} \pm 0.4 \text{ (sys.) GeV}$

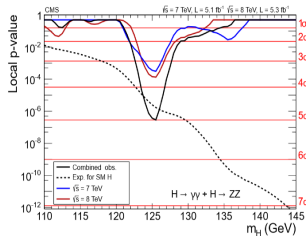
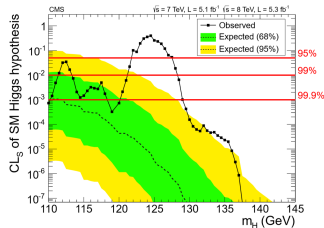
⇒ Signifikanz: 5.9σ

■ CMS: m_H

⇒ $125.3 \pm 0.4 \text{ (stat.)} \pm 0.5 \text{ (sys.) GeV}$

⇒ Signifikanz: 5.0σ

Higgs-Masse m_H

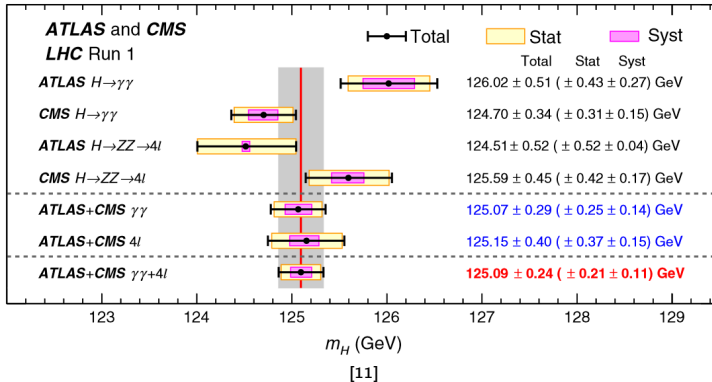


[7]

- ATLAS: m_H
 - $\Rightarrow 126 \pm 0.4$ (stat.) ± 0.4 (sys.) GeV
 - $\Rightarrow$ Signifikanz: 5.9σ
- CMS: m_H
 - $\Rightarrow 125.3 \pm 0.4$ (stat.) ± 0.5 (sys.) GeV
 - $\Rightarrow$ Signifikanz: 5.0σ

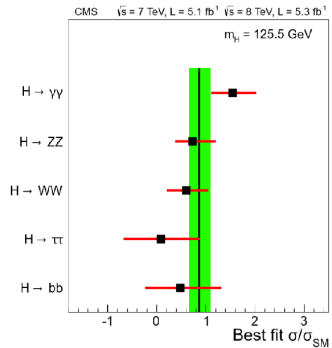
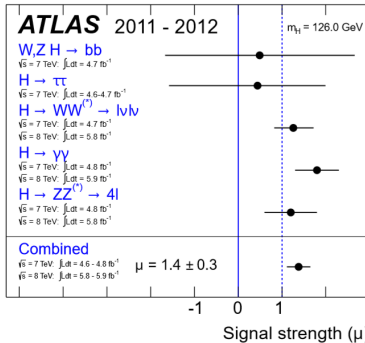
Higgs-Masse m_H 2

■ 2015: $m_H = 125.09 \pm 0.21(\text{stat.}) \pm 0.11(\text{sys.}) \text{ GeV}$



Signalstärken μ

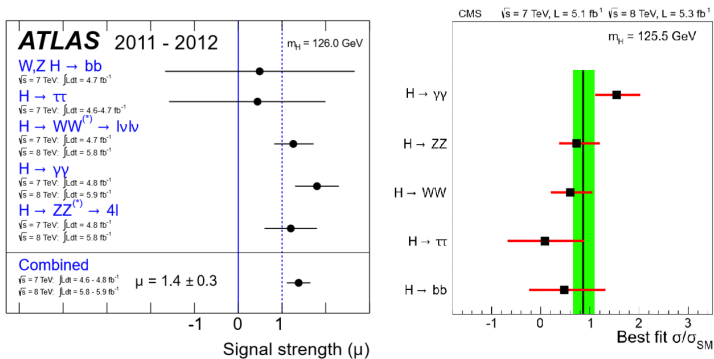
- ATLAS: $\mu = 1.4 \pm 0.3$, $\mu = 1.18 \pm 0.15$ (2015)
- CMS: $\mu = 0.87 \pm 0.23$, $\mu = 1 \pm 0.14$ (2015)



Signalstärken ATLAS (links) & CMS (rechts) [6,7]

Signalstärken μ

- ATLAS: $\mu = 1.4 \pm 0.3$, $\mu = 1.18 \pm 0.15$ (2015)
- CMS: $\mu = 0.87 \pm 0.23$, $\mu = 1 \pm 0.14$ (2015)

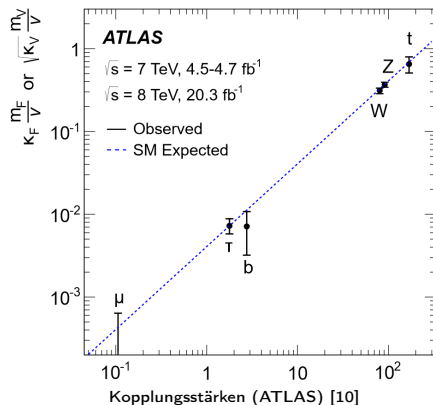


Signalstärken ATLAS (links) & CMS (rechts) [6,7]

Spin und Parität

- Winkelverteilung der Zerfallsprodukte erlaubt Aussage über Spin J & Parität P
- SM: $J^P = 0^+$
- ⇒ Analyse der Experimentdaten: $J^P = 0^+$
- ⇒ alternative J^P – Werte können zu mehr als 99% ausgeschlossen werden

Kopplung an Bosonen und Fermionen

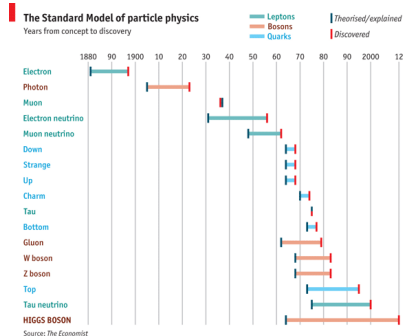


- Fermionen: $\propto m_F/\nu$
 - Vektorbosonen: $\propto m_V^2/\nu$
 - Skalierungsfaktoren:
- ⇒ SM: $\kappa_{F,i} = \kappa_{V,i} = 1$
- Starker Hinweis für Kopplung an Fermionen

ν : Vakuumserwartungswert

Zusammenfassung und Ausblick

- Präzise Messung des Higgs-Boson
- ⇒ Eigenschaften bestätigen SM
- ⇒ Nobelpreis: Peter Higgs & François Englert (4. Juli 2013)
- Starke Hinweise für die Kopplung an Fermionen und Vektorbosonen
- höhere Präzision:
- ⇒ mehr Statistik
- ⇒ größere Schwerpunktsenergie



[30]

Quellenverzeichnis (Paper) 1

- [1] P. W. Anderson, Phys. Rev. 130, 439 (1963)
- [2] Peter W. Higgs, Phys. Rev. Lett. 13, 508 (1964)
- [3] Peter W. Higgs, Phys. Rev. 145, 1156 (1966)
- [4] F. Englert and R. Brout, Phys. Rev. Lett. 13, 321 (1964)
- [5] G. S. Guralnik, C. R. Hagen, and T. W. B. Kibble, Phys. Rev. Lett. 13, 585 (1964)
- [6] ATLAS Collaboration, akzeptiert bei Phys. Lett. B, arXiv 1207.7214
- [7] CMS Collaboration, akzeptiert bei Phys. Lett. B, arXiv 1207.7235
- [8] J. Goldstone, Il Nuovo Cimento. 19/1961, S. 154
- [9] Jeffrey Goldstone, Abdus Salam, and Steven Weinberg, Phys. Rev. 127, 965 (1962)
- [10] ATLAS Collaboration, arXiv:1507.04548
- [11] ATLAS Collaboration, CMS Collaboration, Phys. Rev. Lett. 114, 191803

- [12] "Das Higgs-Teilchen und seine Väter", T. Plehn und M. Krämer, Phys. Journal, 12/2013, Seite 24
- [13] "Higgs- oder nicht Higgs-Boson", M. Schuhmacher und C. Weiser, Phys. Journal, 09/2012, Seite 18
- [14] "Das Profil des Higgs-Bosons", K. Jakobs, Phys. Journal, 09/2015, Seite 35
- [15] "Mit Schwung durch die Hutkrempe", D. Manske und M. Dressel, Phys. Journal, 01/2016, Seite 37

- [16] <https://de.wikipedia.org/wiki/Standardmodell>
- [17] <http://www.lhc-facts.ch/index.php?page=atlas>
- [18] https://en.wikipedia.org/wiki/Peter_Higgs
- [19] https://en.wikipedia.org/wiki/François_Englert
- [20] https://en.wikipedia.org/wiki/Robert_Brout
- [21] https://en.wikipedia.org/wiki/Tom_Kibble
- [22] https://en.wikipedia.org/wiki/C._R._Hagen
- [23] https://en.wikipedia.org/wiki/Gerald_Guralnik
- [24] https://en.wikipedia.org/wiki/Higgs_boson
- [25] <http://www.lhc-facts.ch/index.php?page=atlas#inner>
- [26] https://cms-docdb.cern.ch/cgi-bin/PublicDocDB/RetrieveFile?docid=4172&filename=CMS_Slice.gif&version=2
- [27] <https://de.wikipedia.org/wiki/Tevatron>

Quellenverzeichnis 4

- [28] http://ihp-lx.ethz.ch/CompMethPP/zphys/pictures/LEP_schema.jpg
- [29] https://de.wikipedia.org/wiki/Large_Hadron_Collider#/media/File:LHC_02.svg
- [30] <http://scienceblogs.de/plazeboalarm/index.php/zeitleiste-das-standardmodell-der-teilchenphysik/>
- [31] [https://en.wikipedia.org/wiki/Spontaneous_symmetry_breaking#/media/File:Spontaneous_symmetry_breaking_\(explanatory_diagram\).png](https://en.wikipedia.org/wiki/Spontaneous_symmetry_breaking#/media/File:Spontaneous_symmetry_breaking_(explanatory_diagram).png)
- [32] <http://homepages.physik.uni-muenchen.de/~Otmar.Biebel/hep-seminar/HStiele.pdf>
- [33] http://www.desy.de/~schleper/lehre/TeilchenFortgeschrittene/WS_2010_11/Vortraege_Studierende/Spontane_Symmetriebrechung.pdf
- [34] <http://www.desy.de/~geiser/Lehre/SS09/higgs09.pdf>
- [35] <http://www.lhc-facts.ch/index.php?page=lhc>

Masseterm

Im SM-Lagrangian ist der Masseterm für Bosonen: $m_B^2 B^\mu B_\mu$

Unter Eichtransformation muss dann gelten:

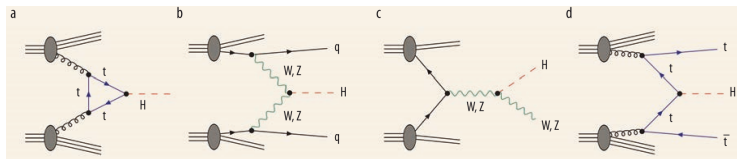
$$\Rightarrow m_B^2 B^\mu B_\mu = m_B^2 B'^\mu B'_\mu$$

U(1)-Transformation: $B^\mu \rightarrow B^\mu - \partial^\mu \alpha$

$$\begin{aligned} \Rightarrow m_B^2 B^\mu B_\mu &\neq m_B^2 (B^\mu - \partial^\mu \alpha)(B_\mu - \partial_\mu \alpha) \\ \Leftrightarrow m_B^2 B^\mu B_\mu &\neq m_B^2 B^\mu B_\mu - \underbrace{m_B^2 (B^\mu \partial_\mu \alpha + \partial^\mu \alpha B_\mu)}_{\neq 0} + m_B^2 \partial^\mu \alpha \partial_\mu \alpha \end{aligned}$$

$\Rightarrow$ Bosonenmasse muss Null sein!

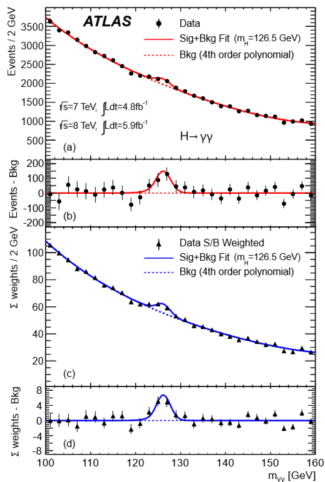
Erzeugungsprozesse



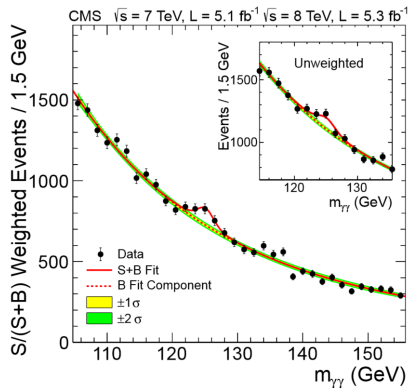
Erzeugungsprozesse von Higgs-Bosonen am LHC [14]

- a** Gluonfusion
- b** Vektorbosonfusion
- c** Assoziierte WH- & ZH-Produktion
- d** Assoziierte ttH-Produktion

$$H \rightarrow \gamma\gamma$$

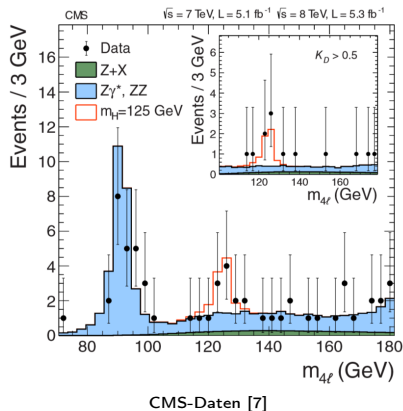
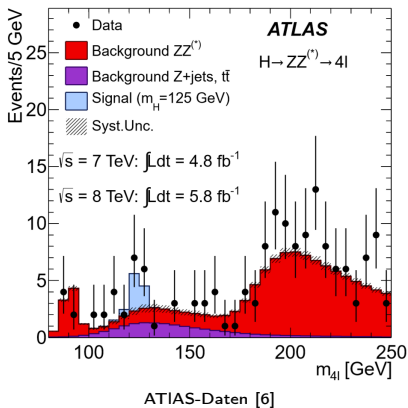


ATLAS-Daten [6]

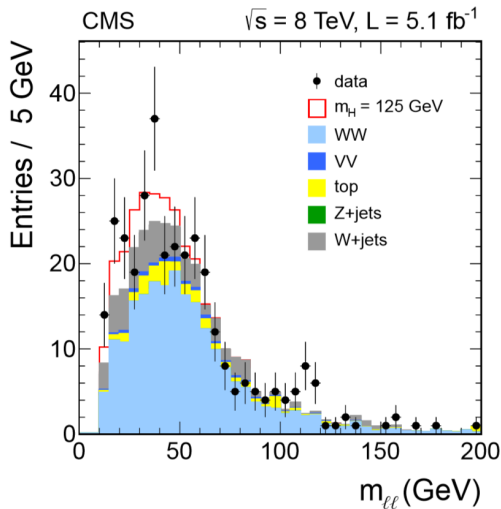


CMS-Daten [7]

$$H \rightarrow ZZ^* \rightarrow 4l$$



$$H \rightarrow W^+ W^- \rightarrow e \nu \mu \nu$$



CMS-Daten [7]

$$H \rightarrow \tau^+ \tau^-$$

