

Die Suche nach dem Higgs-Teilchen am LHC

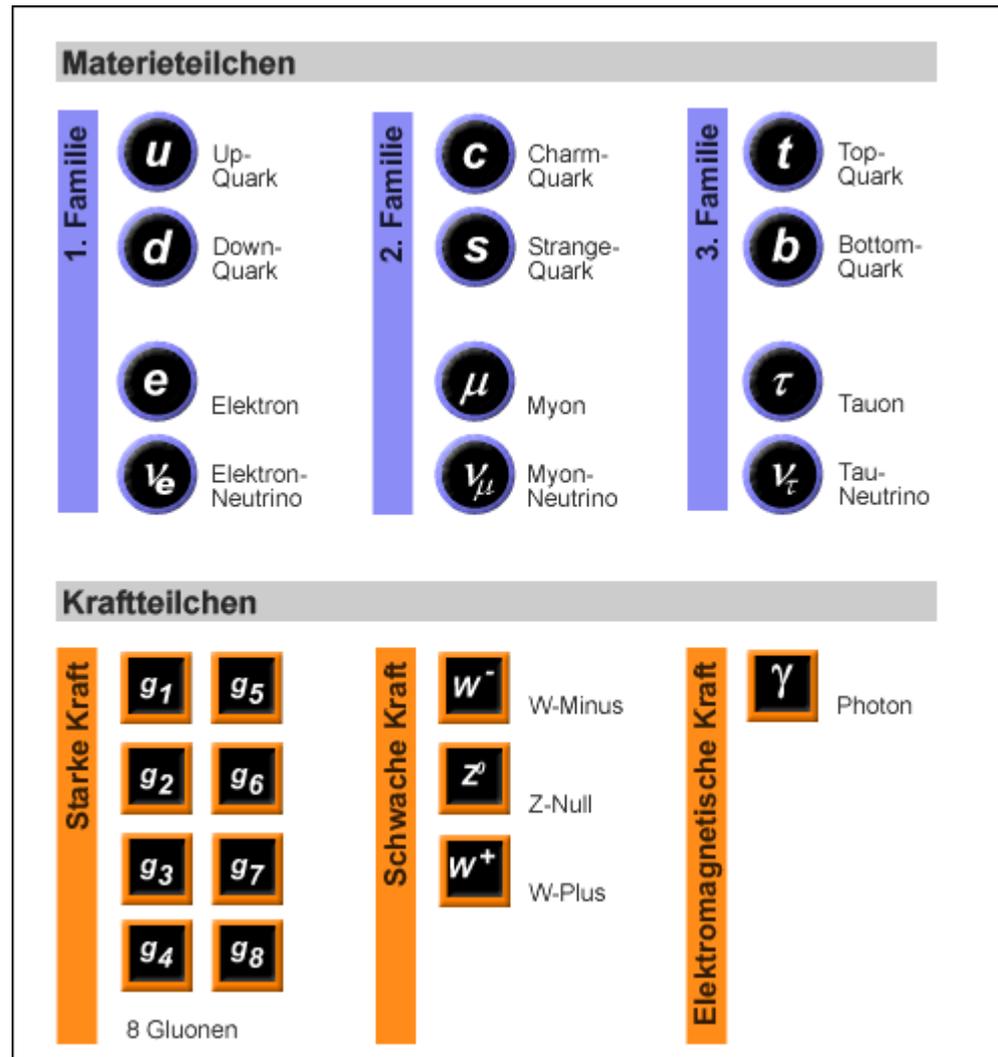
Seminarvortrag am 17.06.2010

Marco Brandl

Inhalt

- Das Standardmodell und die Eichtheorien
- Der Higgs-Mechanismus
- Die Suche nach dem Higgs-Boson am LHC

Das Standardmodell und die Eichtheorien



Das Standardmodell und die Eichtheorien

Jetzt: Mathematische Beschreibung des Standardmodells
→ Quantenfeldtheorie

Wichtigste „Zutaten“:

- Lagrangemechanik der Felder → „Lagrangedichten“
- Eichinvarianz der Felder (global und **lokal**)

Das Standardmodell und die Eichtheorien

Lagrangemechanik

Erinnerung:

Lagrangefunktion $L = T - U$

Euler-Lagrange -Gleichung $\frac{d}{dt} \frac{\partial L}{\partial \dot{q}_i} - \frac{\partial L}{\partial q_i} = 0$

In der Teilchenphysik (Teilchen \rightarrow Felder): Lagrangedichten $L = \int \mathcal{L} d^3 r$

Lagrangedichtefunktionen sagen uns (fast) alles über die Elementarteilchen und ihre Wechselwirkungen

Das Standardmodell und die Eichtheorien

Lagrangemechanik

Beispiel: Dirac Lagrangedichte

$$\mathcal{L} = i(\hbar c) \bar{\psi} \gamma^\mu \partial_\mu \psi - (mc^2) \bar{\psi} \psi$$



Euler-
Lagrange
Gleichung

$$i \gamma^\mu \partial_\mu \psi - \left(\frac{mc}{\hbar} \right) \psi$$

Dirac-Gleichung: Beschreibt ungeladenes Spin-1/2-Teilchen mit Masse m

Das Standardmodell und die Eichtheorien

Eichinvarianz am Beispiel der QED

Eichinvarianz in der Quantenelektrodynamik: Phaseninvarianz des Feldes
(Symmetriegruppe $U(1)$)

Globale Eichinvarianz: Betrag des Feldes invariant unter globaler Phasenänderung

$$\psi \rightarrow e^{i\theta} \psi$$

(kein Problem)

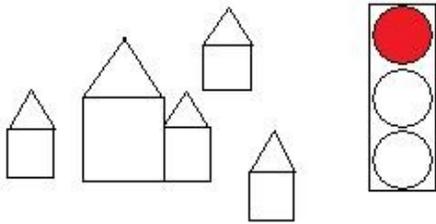
Lokale Eichinvarianz: Betrag des Feldes invariant unter lokaler Phasenänderung

$$\psi \rightarrow e^{i\theta(x)} \psi$$

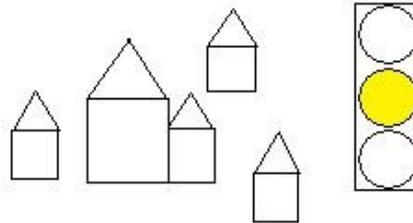

(Lagrangian muss angepasst werden)

Das Standardmodell und die Eichtheorien

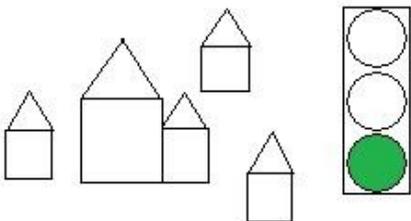
Analogon zur lokalen Eichinvarianz



- Verschiedene Dörfer führen unterschiedliche Verkehrsordnungen ein (lokale Phasenunterschiede)

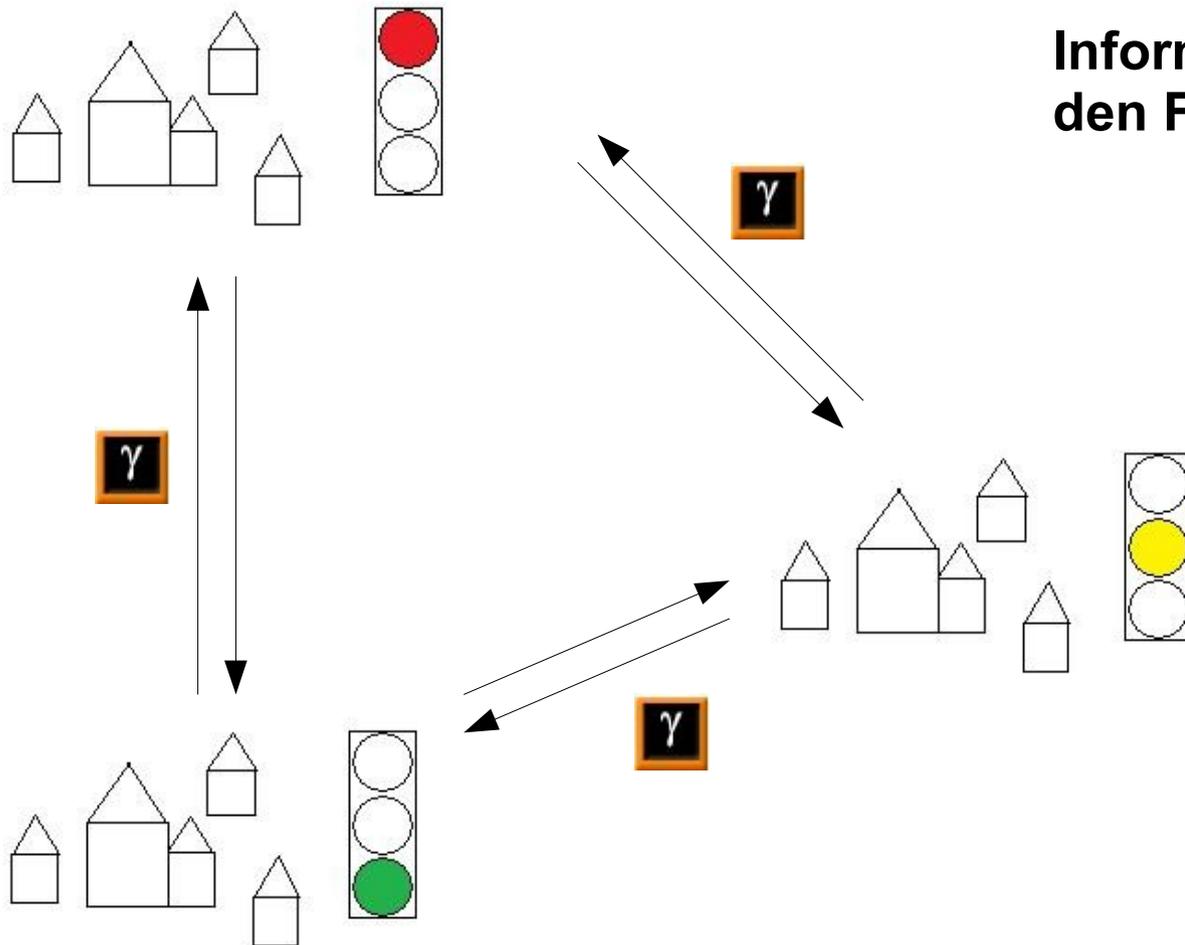


- Wie lassen sich trotzdem Unfälle vermeiden?



Das Standardmodell und die Eichtheorien

Analogon zur lokalen Eichinvarianz



Informationsaustausch zwischen den Fahrern verschiedener Dörfer!

Was gezeigt werden soll:

Felder und Teilchen der fundamentalen Wechselwirkungen ergeben sich ganz natürlich aus dem Prinzip der lokalen Eichinvarianz!

Das Standardmodell und die Eichtheorien

Eichinvarianz am Beispiel der QED

Zurück zum Dirac Lagrangian: $\mathcal{L} = i(\hbar c)\bar{\psi}\gamma^\mu\partial_\mu\psi - (mc^2)\bar{\psi}\psi$

Keine lokale Invarianz! $\mathcal{L} \rightarrow \mathcal{L} - \hbar c(\partial_\mu\theta)\bar{\psi}\gamma^\mu\psi$

Lösung: Einführung zusätzlicher Terme

$$\mathcal{L} = i(\hbar c)\bar{\psi}\gamma^\mu\partial_\mu\psi - (mc^2)\bar{\psi}\psi - (q\bar{\psi}\gamma^\mu\psi)A_\mu + \left[\frac{1}{16\pi}F^{\mu\nu}F_{\mu\nu}\right]$$

Kopplung
zwischen ψ und A_μ

Term für das „freie“
Feld A_μ

A_μ beschreibt „massenloses“ Vektorfeld mit folgender Transformation

$$A_\mu \rightarrow A_\mu - \frac{\hbar c}{q}\partial_\mu\theta(x)$$

Außerdem ist A_μ nichts anderes als das elektromagnetische Potential!

Das Standardmodell und die Eichtheorien

Eichinvarianz am Beispiel der QED

Aus lokaler Eichinvarianz folgen auf natürliche Weise alle Felder und Eichbosonen des Standardmodells (zumindest in QED und QCD)

Das Standardmodell und die Eichtheorien

Problem: Methode der lokalen Eichinvarianz versagt bei Theorie der elektroschwachen WW

Symmetrie: $SU(2) \times U(1)$

Eichtransformationen: $\psi \rightarrow e^{i\theta(x)} \psi$ $\psi \rightarrow e^{i\tau \cdot a(x)} \psi$



- Massenterme der Bosonen verschwinden (wie in QED und QCD)
- Massenterme der Fermionen verschwinden

Sowohl Fermionen als auch W^\pm und Z^0 haben (experimentell nachgewiesene) Massen!

Lösung: Der Higgs-Mechanismus

Der Higgs-Mechanismus

Prinzipielle Vorgehensweise

Einführung eines neuen skalaren Feldes

„Spontane Symmetriebrechung“

Lokale Eichinvarianz

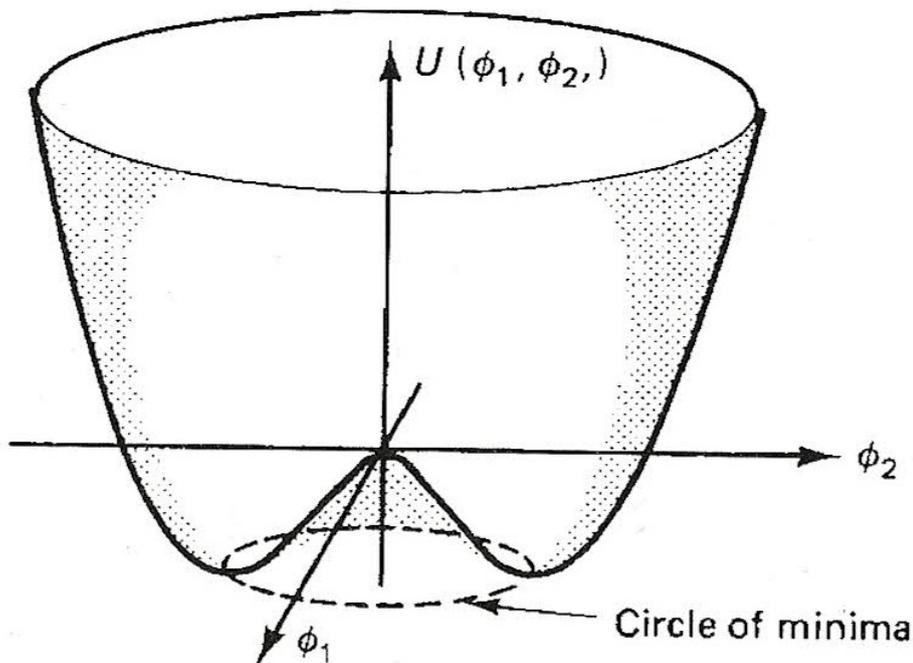
Masse!



Quelle: wikicommons

Der Higgs-Mechanismus

Einschub: Spontane Symmetriebrechung

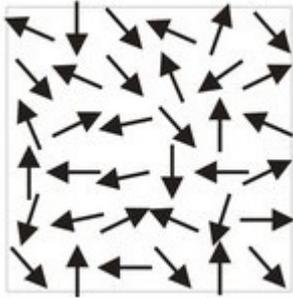


- Beispiel: Symmetrisches, komplexes „sombbrero-hat“-Potential
- Kreis kontinuierlicher Minima
- System kann sich für beliebigen Grundzustand entscheiden
- Symmetrie ist damit „gebrochen“ (bzw. „versteckt“)
- Ohne äußere Einwirkung möglich → „spontan“

Der Higgs-Mechanismus

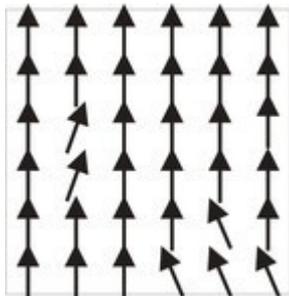
Einschub: Spontane Symmetriebrechung

Einfacheres Beispiel:
Ferromagnet



Raumsymmetrie

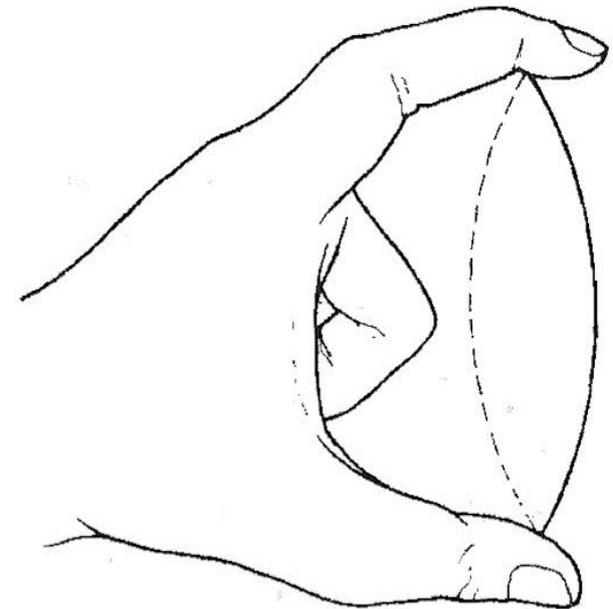
Kühlen unter
Curie-Temperatur



Symmetrie gebrochen

Quelle: Supermagnete.com

(noch) Einfacheres Beispiel:



Quelle: Griffiths

Der Higgs-Mechanismus

Elektroschwache Wechselwirkung:

Higgs-Dublett:
$$\Phi = \begin{pmatrix} \Phi^\dagger \\ \Phi^0 \end{pmatrix} = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{pmatrix} \Phi_1^\dagger + i\Phi_2^\dagger \\ \Phi_1^0 + i\Phi_2^0 \end{pmatrix}$$

Zugehörige Lagrangedichte:
$$\mathcal{L}_{\text{higgs}} = \underbrace{(D_\mu \Phi)^\dagger (D^\mu \Phi)}_{\text{Wechselwirkungen}} - \underbrace{\mu^2 \Phi^\dagger \Phi - \lambda (\Phi^\dagger \Phi)^2}_{\text{Potential}} \quad \lambda > 0 \quad \mu^2 < 0$$

Spontane Symmetriebrechung und „unitäre Eichung“:

$$\Phi(x) = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{pmatrix} 0 \\ v + \rho(x) \end{pmatrix} \quad v^2 = -\frac{\mu^2}{\lambda}$$

Der Higgs-Mechanismus

Lagrangedichte ohne Wechselwirkungsterme:

$$\mathcal{L}_{higgs} = \frac{1}{2}(\partial_\mu \rho)^2 - \underbrace{\mu^2 \rho^2}_{\text{Massenterm für das Higgs-Boson}} - \lambda v \rho^3 - \frac{1}{4} \lambda \rho^4 + \frac{1}{2} \underbrace{\frac{g_1^2 v^2}{4}}_{\text{Massenterm für W-Bosonen}} (W_\mu^1 W^{\mu 1} + W_\mu^2 W^{\mu 2}) + \frac{1}{8} v^2 (g_2 B_\mu - g_1 W_\mu^3)(g_2 B^\mu - g_1 W^{\mu 3})$$

Massenterm
für das
Higgs-Boson

$$m_h = \sqrt{2} \mu$$

Massenterm
für W-Bosonen

$$m_W = \frac{g_1 v}{2}$$

weitere Umformungen

Massenterm
für Z-Boson

$$m_Z = \frac{1}{2} v \sqrt{g_1^2 + g_2^2}$$

Massenloses
Photon

$$m_\gamma = 0$$

Was ist mit den Fermionen? → Yukawa-Kopplung

Der Higgs-Mechanismus

Yukawa-Kopplung: $\mathcal{L}_{\text{Yukawa}} = -g_f (\bar{\psi}_L \Phi \psi_R + \bar{\psi}_R \Phi^\dagger \psi_L)$

Spontane
Symmetriebrechung

$$\mathcal{L}_{\text{Yukawa}} = -\underbrace{\frac{g_f v}{\sqrt{2}}}_{\text{Massenterm}} \bar{\psi} \psi - \underbrace{\frac{g_f}{\sqrt{2}} \rho}_{\text{Kopplungsterm}} \bar{\psi} \psi$$

Massenterm
für
Fermionen

Kopplungsterm

$$m_f = \frac{g_f v}{\sqrt{2}}$$

**Wichtig: Kopplung an das Higgs immer proportional zur Masse des Teilchens
(und umgekehrt)**

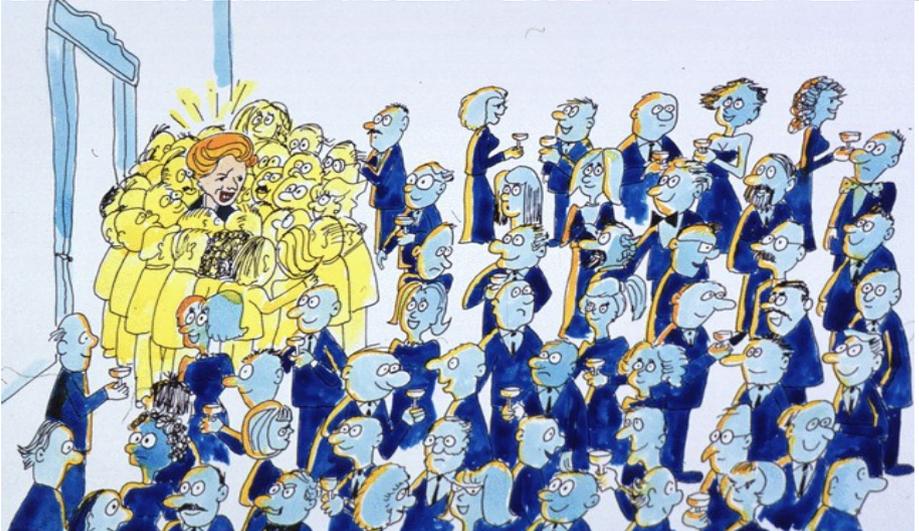
Der Higgs-Mechanismus

Analogon für den englischen Wissenschaftsminister



- Cocktailparty mit homogen verteilten Gästen

Dies entspricht dem Higgs-Feld



- VIP (Margaret Thatcher) betritt den Raum
- Partygäste versammeln sich um die VIP

So kann das Higgs-Feld den Elementarteilchen ihre Masse verleihen

Der Higgs-Mechanismus

Analogon für den englischen Wissenschaftsminister



- Ein Gerücht wird gestreut

Selbstwechselwirkung des Higgs-Feldes



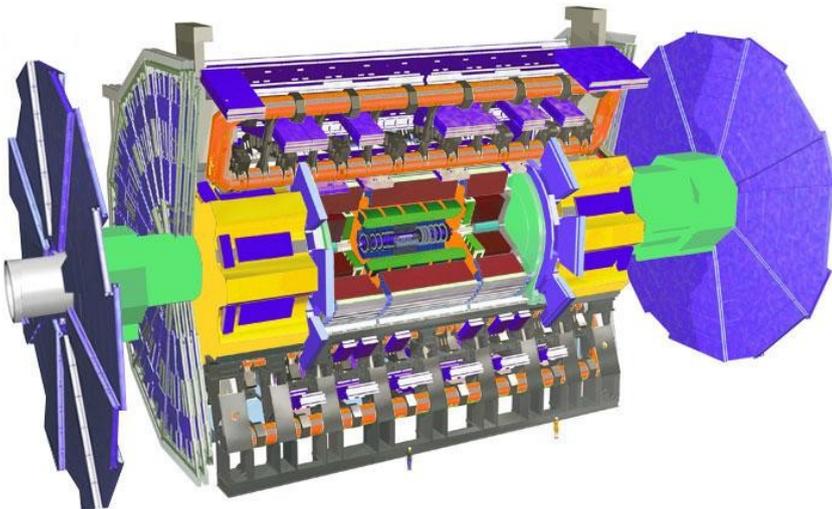
- Das Gerücht „bewegt“ sich durch den Raum

Das Higgs-Teilchen

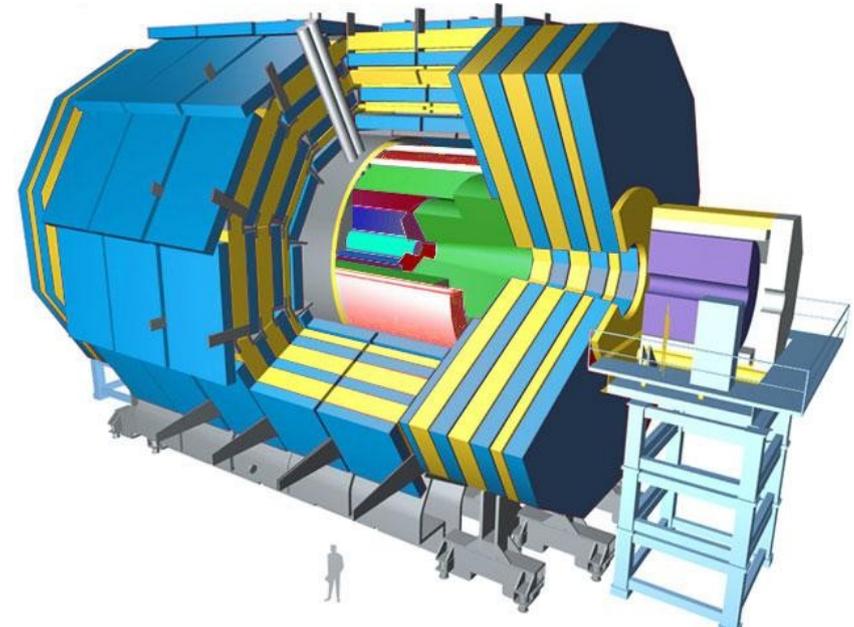
Die Suche nach dem Higgs-Boson am LHC

Erinnerung: Detektoren ATLAS/CMS

ATLAS



CMS



- Prinzipieller Aufbau:
- Spurdetektoren
 - Kalorimetersystem (elektromagnetisch, hadronisch)
 - Myonendetektoren

Die Suche nach dem Higgs-Boson am LHC

Warum überhaupt LHC?

- Higgs an bisherigen Beschleunigern noch nicht (eindeutig) nachgewiesen



LHC mit größerer Schwerpunktsenergie (14TeV)
und Luminosität ($10^{34} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$) als jemals zuvor

- LHC deckt gesamten vorhergesagten Energiebereich des Higgs ab

Die Suche nach dem Higgs-Boson am LHC

Einschub: Luminosität

$$R = \sigma \cdot L$$

R : Ereignisrate σ : Wirkungsquerschnitt L : Luminosität

Integrierte Luminosität: $L_{\text{int}} = \int L dt$

Beispiel für LHC: $L_{\text{LHC}} = 10^{34} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$ „Beschleunigerjahr“: $a_{\text{Beschleuniger}} = 10^7 \text{ s}$

$$L_{\text{int}} = \int_0^{a_{\text{Beschleuniger}}} L_{\text{LHC}} dt = L_{\text{LHC}} \cdot a_{\text{Beschleuniger}} = 10^{34} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1} \cdot 10^7 \text{ s} = 10^{41} \text{ cm}^{-2} = 100 \text{ fb}^{-1}$$

Die Suche nach dem Higgs-Boson am LHC

Massenvorraussagen für das Higgs-Boson

Massenuntergrenze aus bisherigen Messungen am LEP-II:

$$m_{\text{higgs}} > 114,1 \text{ GeV}$$

Massenobergrenze variiert je nach Gültigkeitsgrenze des SM

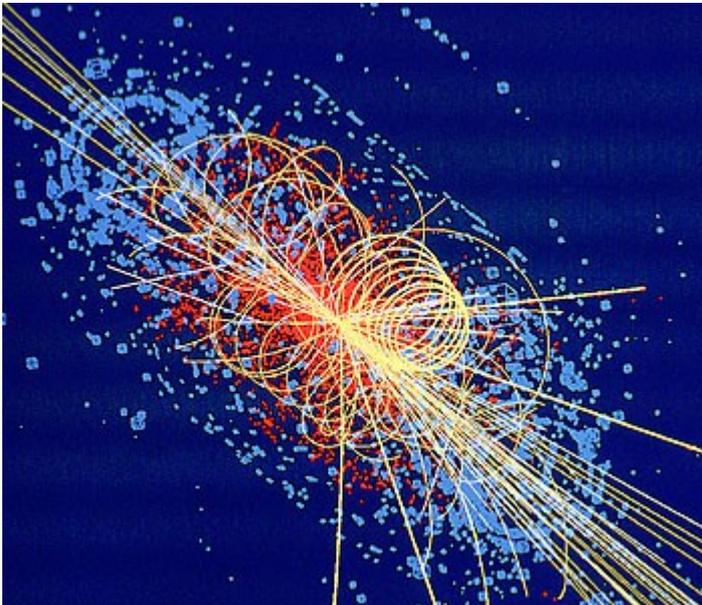
sicher: $m_{\text{higgs}} < 1 \text{ TeV}$

Am wahrscheinlichsten: $114 \text{ GeV} < m_{\text{higgs}} < 250 \text{ GeV}$

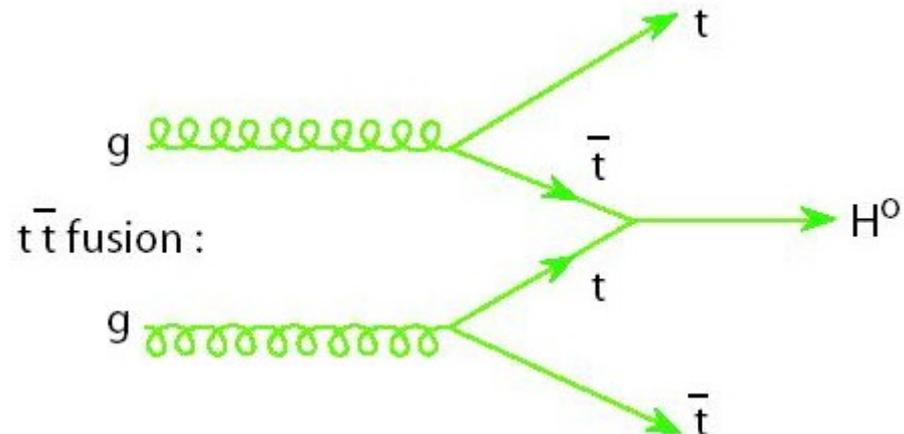
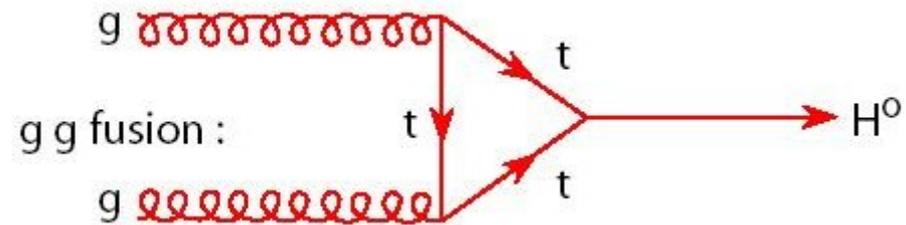
**Wenn die Massenvorraussagen zutreffen werden am LHC auf jeden
Fall Higgs-Bosonen erzeugt!**

Die Suche nach dem Higgs-Boson am LHC

Wie werden die Higgs-Teilchen am LHC erzeugt?



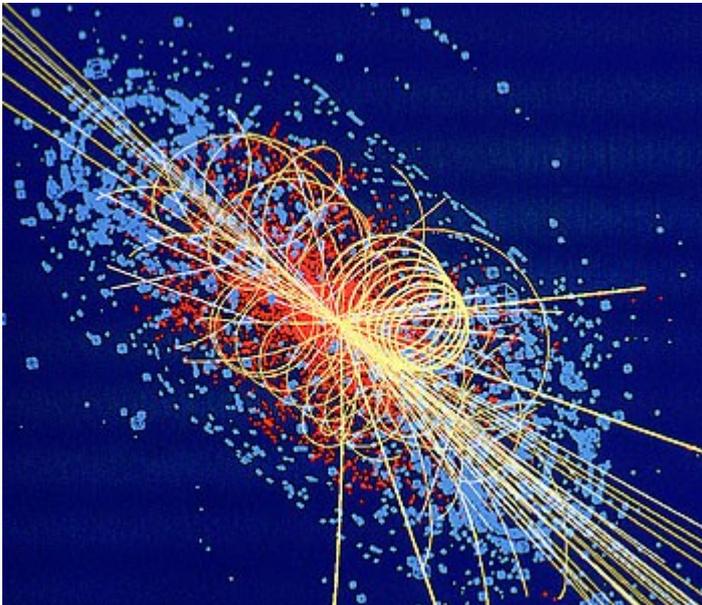
Quelle: bbc.co.uk



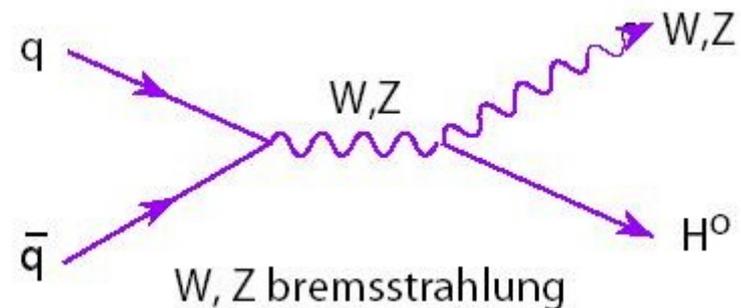
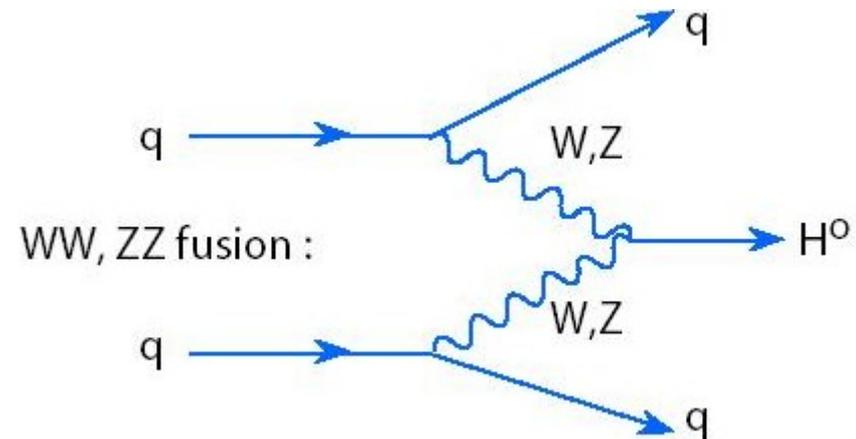
Quelle: www.hep.ph.ic.ac.uk/cms/physics/higgs.html

Die Suche nach dem Higgs-Boson am LHC

Wie werden die Higgs-Teilchen am LHC erzeugt?



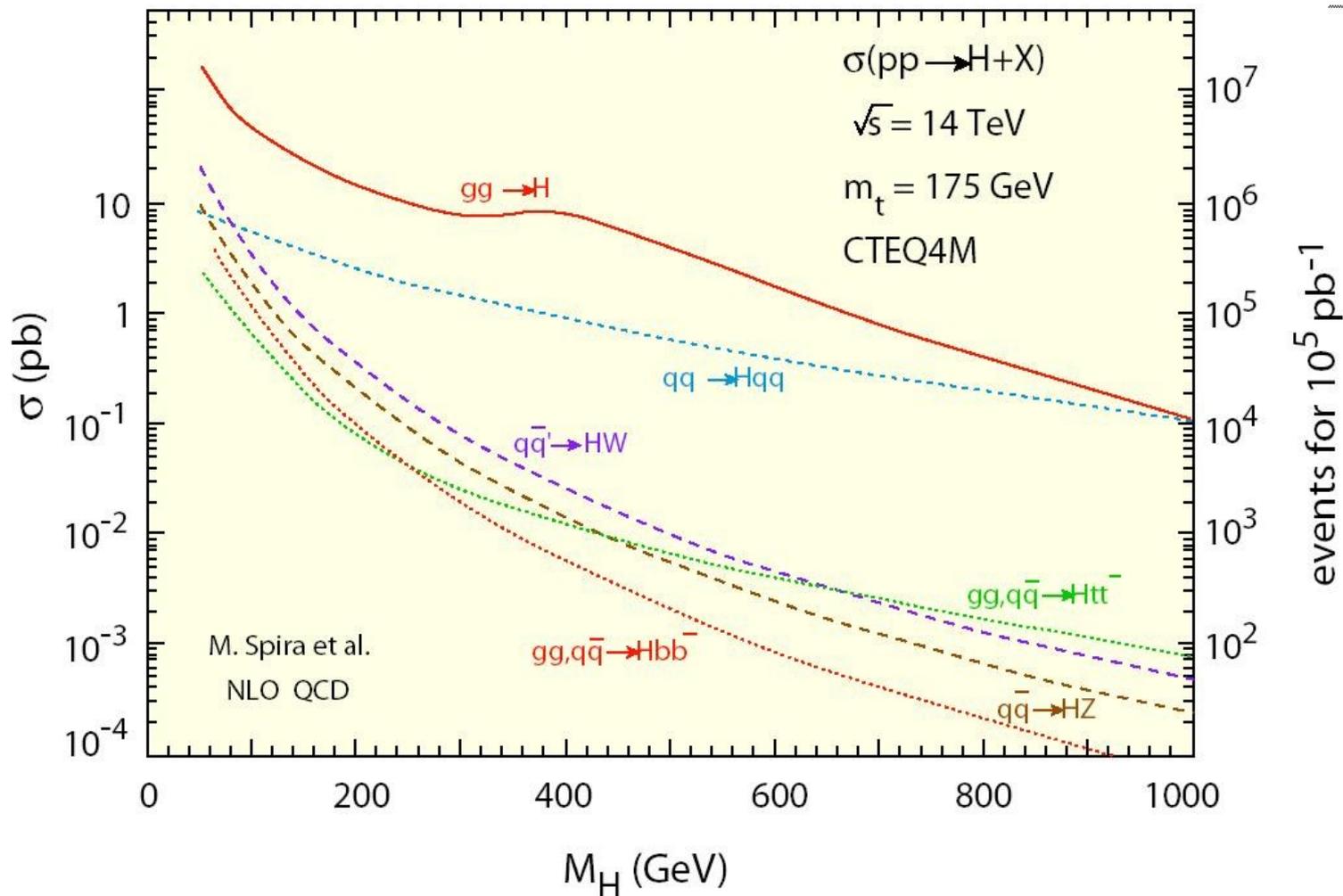
Quelle: bbc.co.uk



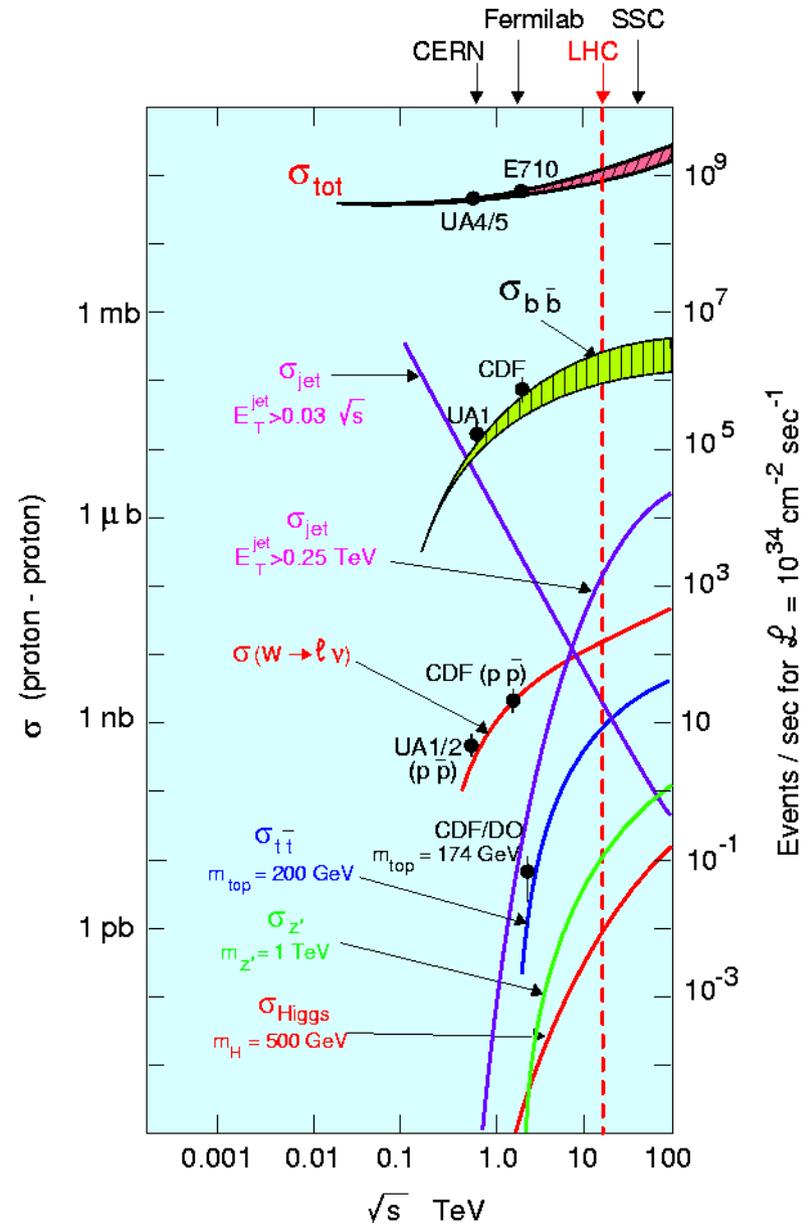
Quelle: www.hep.ph.ic.ac.uk/cms/physics/higgs.html

Die Suche nach dem Higgs-Boson am LHC

Wie werden die Higgs-Teilchen am LHC erzeugt?

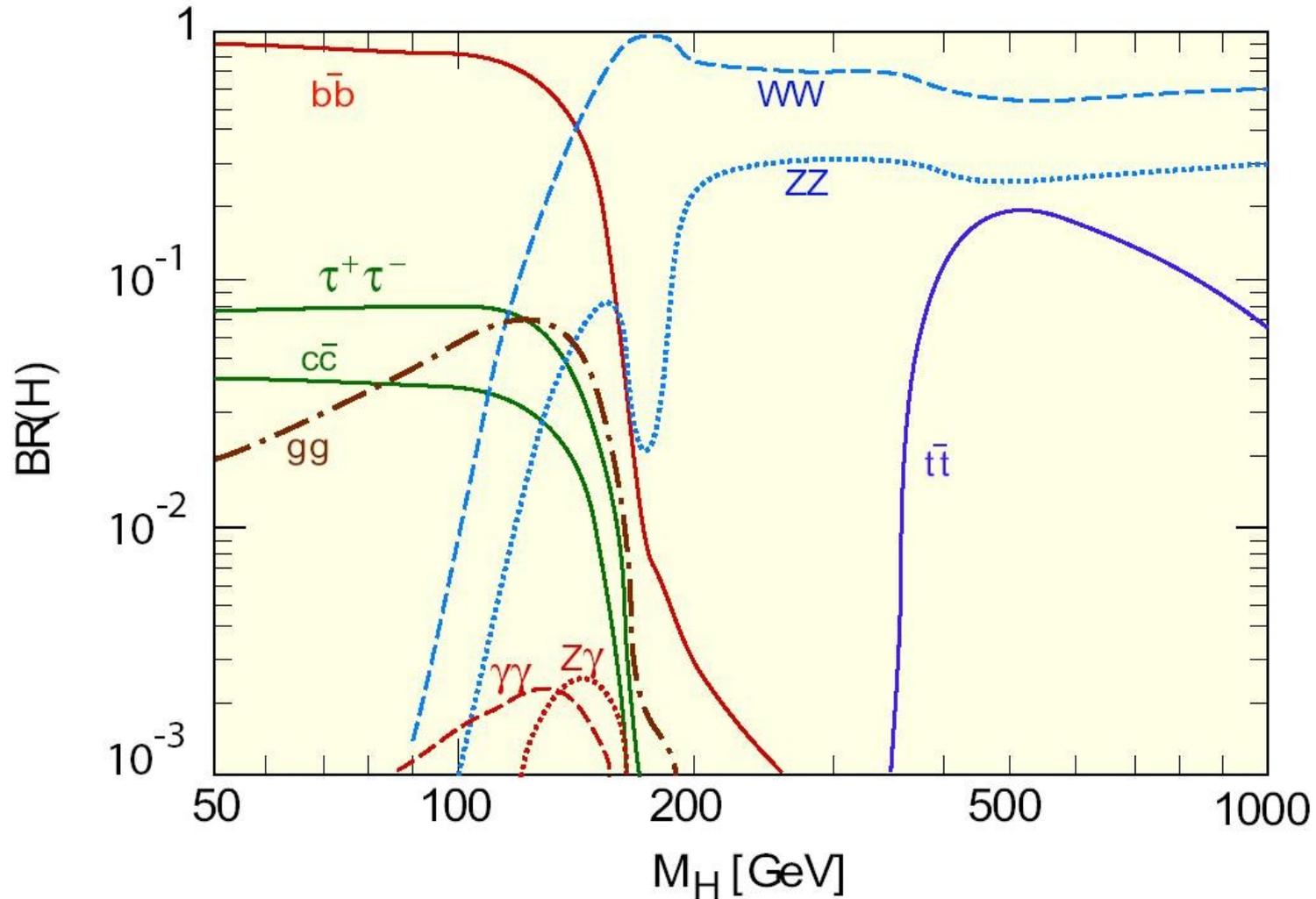


Die Suche nach dem Higgs-Boson am LHC



Die Suche nach dem Higgs-Boson am LHC

Mögliche Zerfallskanäle:



Die Suche nach dem Higgs-Boson am LHC

Im Wesentlichen zwei wichtige Zerfallskanäle:

Für geringe Higgs-Masse (<140 GeV): $H \rightarrow \gamma\gamma$

Für große Higgs-Masse (>140 GeV): $H \rightarrow ZZ \rightarrow l^+l^-l^+l^-$

In anderen Kanälen großer Hintergrund aufgrund dominanter Reaktionen

Die Suche nach dem Higgs-Boson am LHC

$$H \rightarrow \gamma\gamma$$

Messung dieses Kanals aufgrund der hohen Luminosität des LHC möglich

Untergrund durch	Elektromagnetische Schauer	reduzierbar
	Direkte Photonenerzeugung z.B. $q\bar{q} \rightarrow \gamma\gamma$	nicht reduzierbar

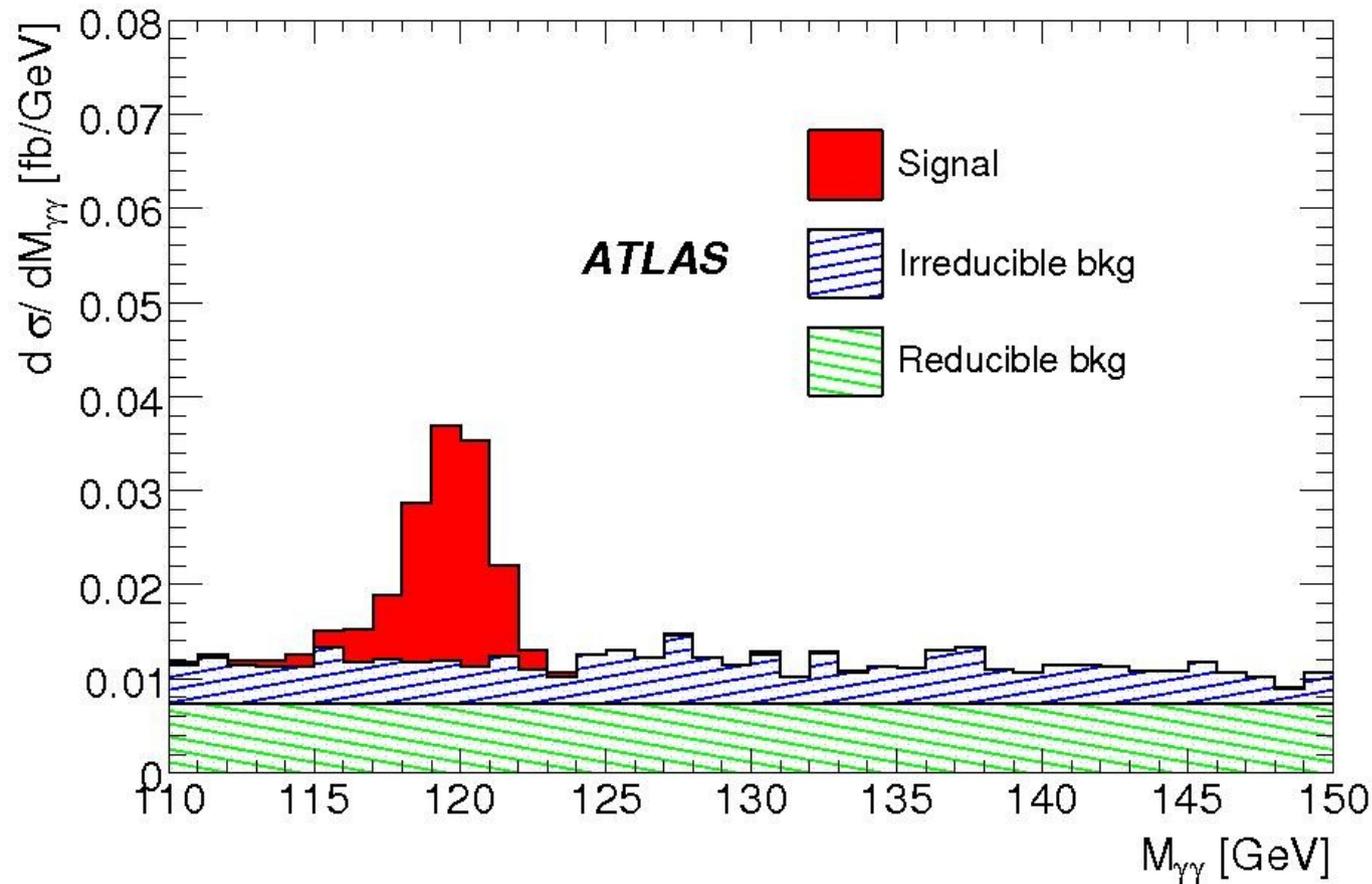
Herausforderungen an die Detektoren:

- Gute Auflösung der EM-Kalorimeter
- Rekonstruktion der einzelnen Photonen

Die Suche nach dem Higgs-Boson am LHC

$$H \rightarrow \gamma\gamma$$

Erwartung/(Hoffnung): Peak bei Masse des Higgs-Teilchens im Energiespektrum der „2-Photonen-Ereignisse“



Quelle:
<https://twiki.cern.ch/twiki/bin/view/Atlas/PublicPlotsHG2>

Die Suche nach dem Higgs-Boson am LHC

$$H \rightarrow ZZ \rightarrow l^+ l^- l^+ l^-$$

Untergrund durch

$$Z b \bar{b} \rightarrow l l \quad c l \nu \quad c l \nu$$

$$t \bar{t} \rightarrow W b W b \rightarrow l \nu \quad c l \nu \quad l \nu \quad c l \nu$$

} reduzierbar

$$ZZ \rightarrow 4l$$

nicht reduzierbar

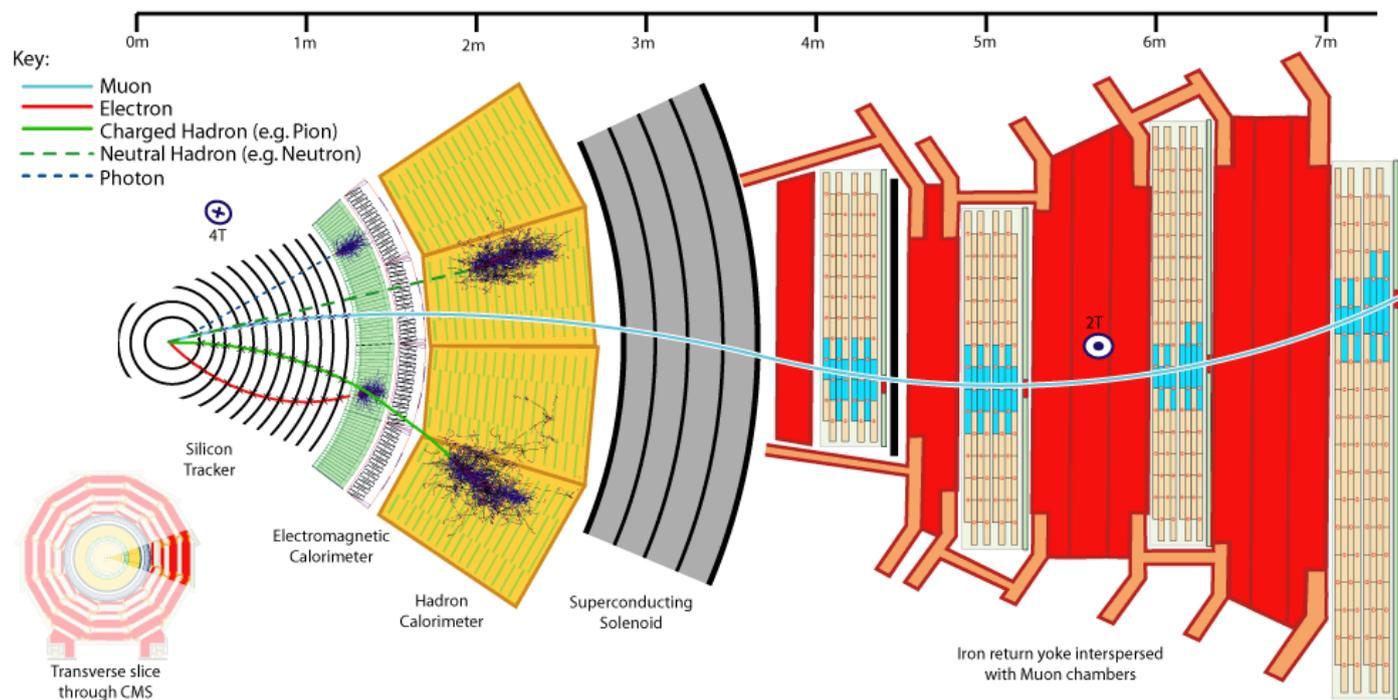
Herausforderungen an die Detektoren:

- Möglichst genaue Energiebestimmung der Leptonen
- Rekonstruktion der Spuren und Vertices

Die Suche nach dem Higgs-Boson am LHC

„Goldener Kanal“ $H \rightarrow ZZ \rightarrow \mu^+ \mu^- \mu^+ \mu^-$

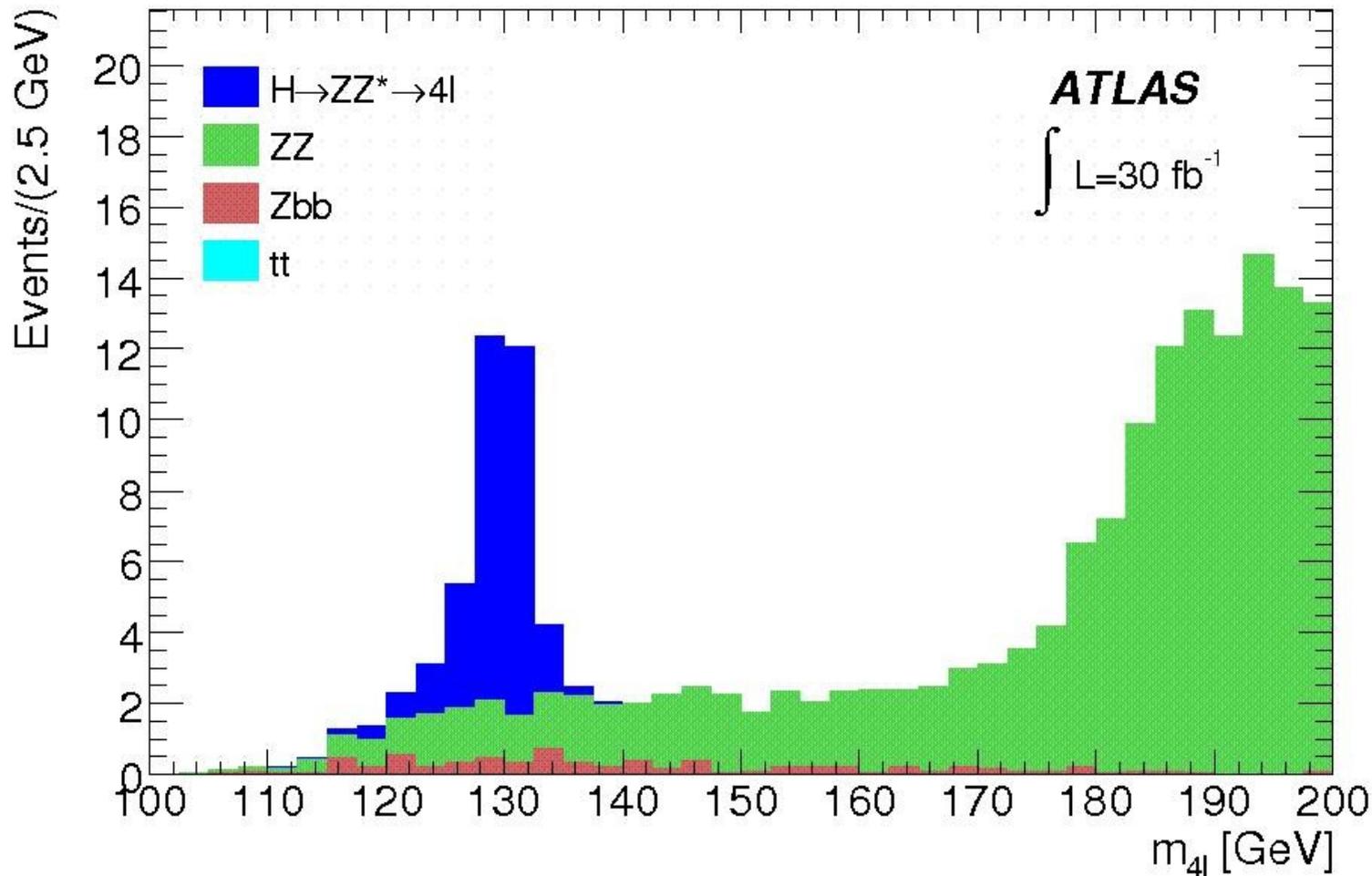
- „Golden“ aufgrund sehr niedrigen Untergrunds
- Erfordert jedoch zuverlässigen Nachweis von Myonen



Die Suche nach dem Higgs-Boson am LHC

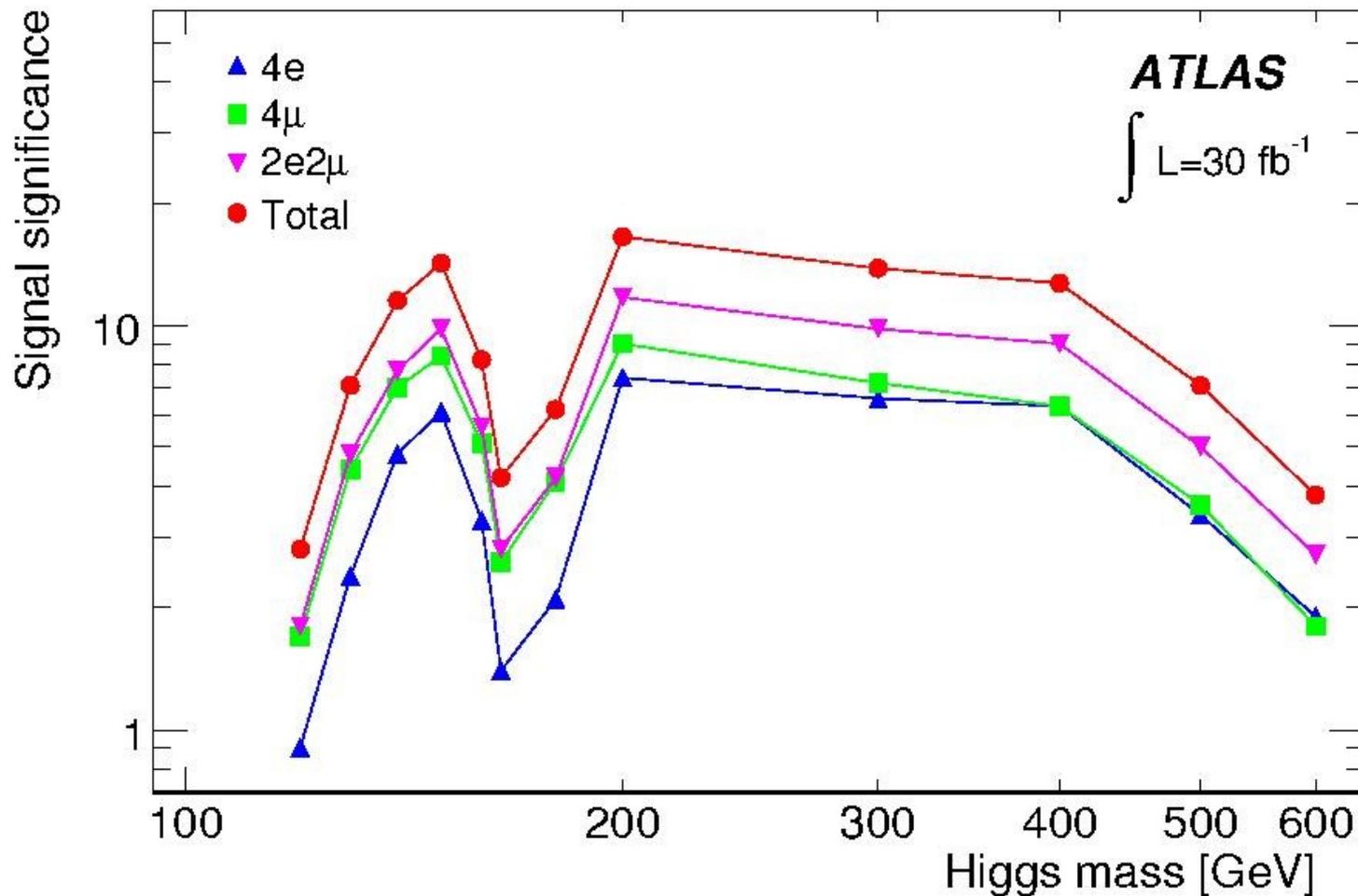
$$H \rightarrow ZZ \rightarrow l^+ l^- l^+ l^-$$

Ziel: Peak bei Masse des Higgs-Bosons



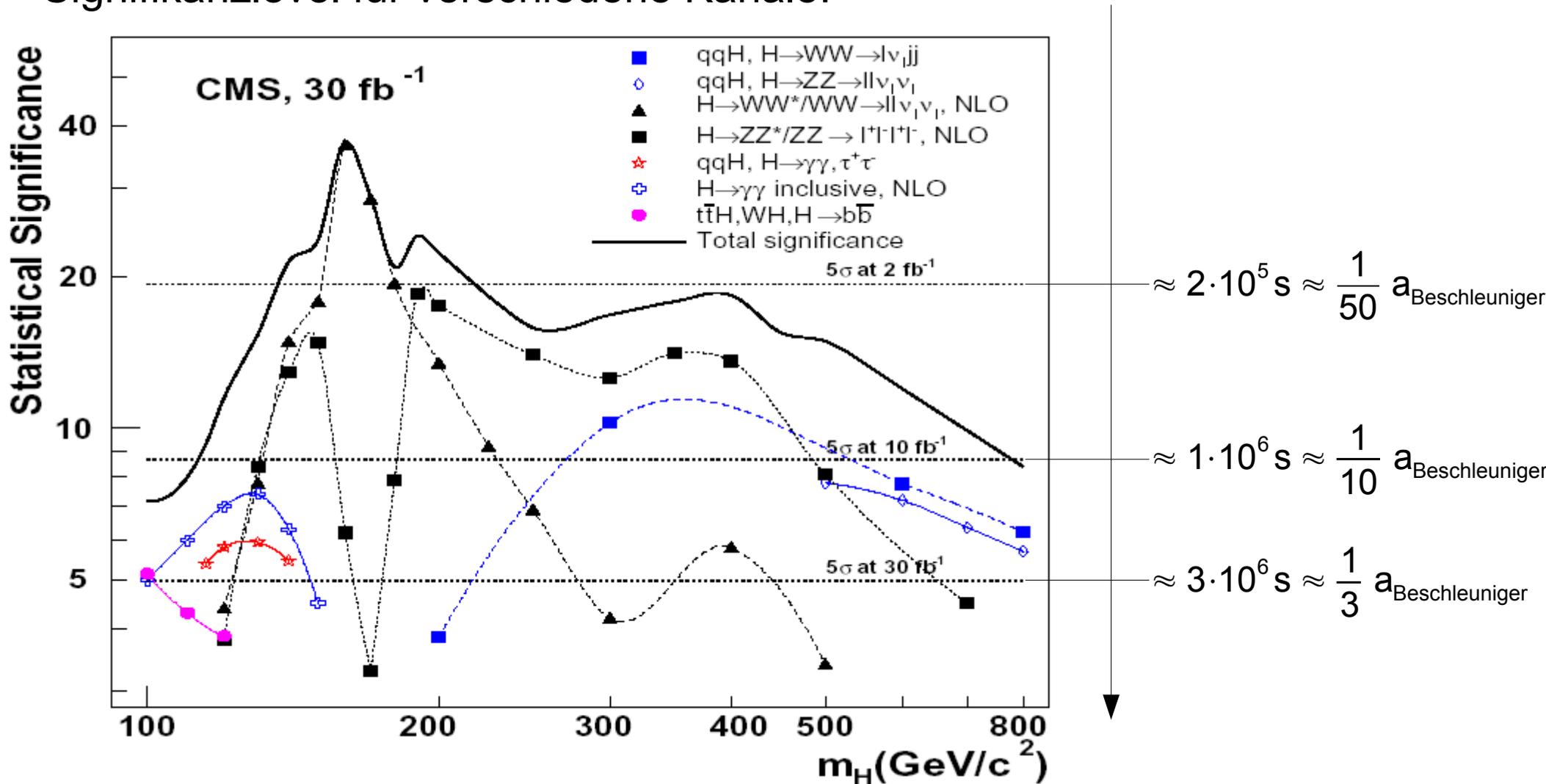
Die Suche nach dem Higgs-Boson am LHC

$$H \rightarrow ZZ \rightarrow l^+ l^- l^+ l^-$$



Die Suche nach dem Higgs-Boson am LHC

Signifikanzlevel für verschiedene Kanäle:



Die Suche nach dem Higgs-Boson am LHC

Zusammenfassung:

- Wenn das Higgs-Boson existiert wird es am LHC gefunden(!)
- Mit signifikanten Ergebnissen ist innerhalb von wenigen Jahren zu rechnen
- Wenn das Higgs-Boson nicht existiert → Problem für das SM

Quellen

- Griffiths, David: *Introduction to Elementary Particles* (WILEY-VCH 2008)
- Internetseiten der ATLAS und CMS Kollaborationen
- Stefan Bricken Seminarvortrag *Die Suche nach dem Higgs-Boson* (http://web.physik.rwth-aachen.de/~klein/seminar/StefanBricken_ausarbeitung.pdf)
- Jochen Heitger Vorlesung *Einführung in das Standardmodell der Elementarteilchentheorie* (http://pauli.uni-muenster.de/tp/fileadmin/lehre/vorlesungen/heitger/einfuehrung_sm_ws06.pdf)
- Für Bilder und Grafiken siehe individuelle Quellenangaben