

# Die Suche nach dem Higgs-Teilchen am LHC

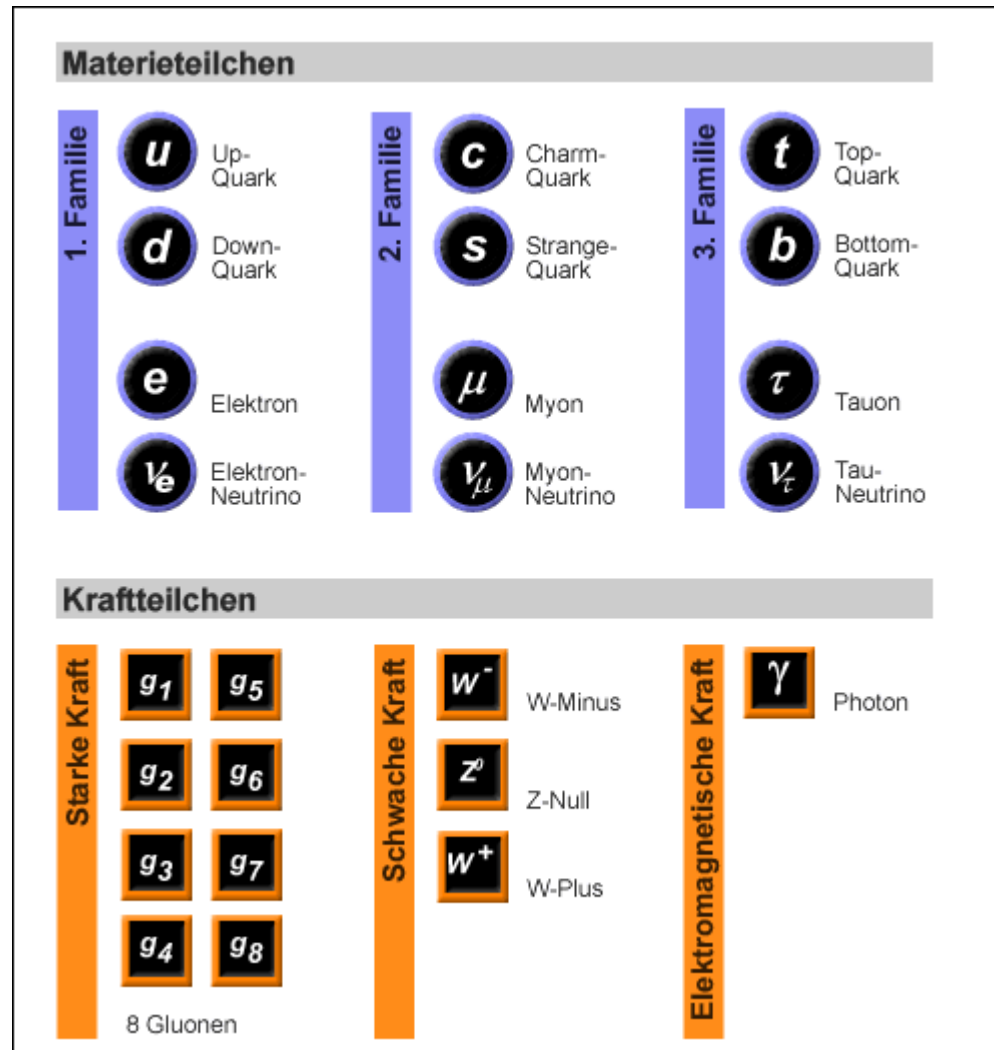
Seminarvortrag am 17.06.2010

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)

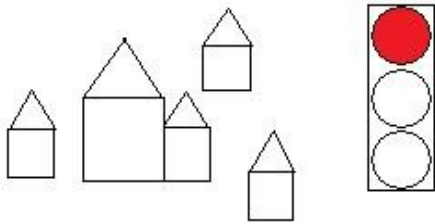
Lokale Eichinvarianz: Betrag des Feldes invariant unter lokaler Phasenänderung

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


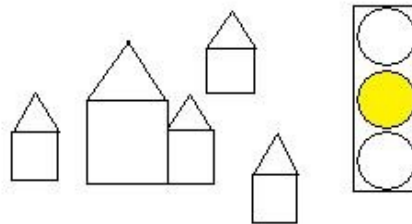
(Lagrangian muss angepasst werden)

# Das Standardmodell und die Eichtheorien

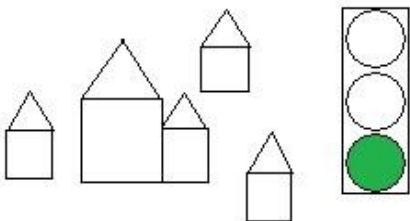
## Analogon zur lokalen Eichinvarianz



- Verschiedene Dörfer führen unterschiedliche Verkehrsordnungen ein (lokale Phasenunterschiede)



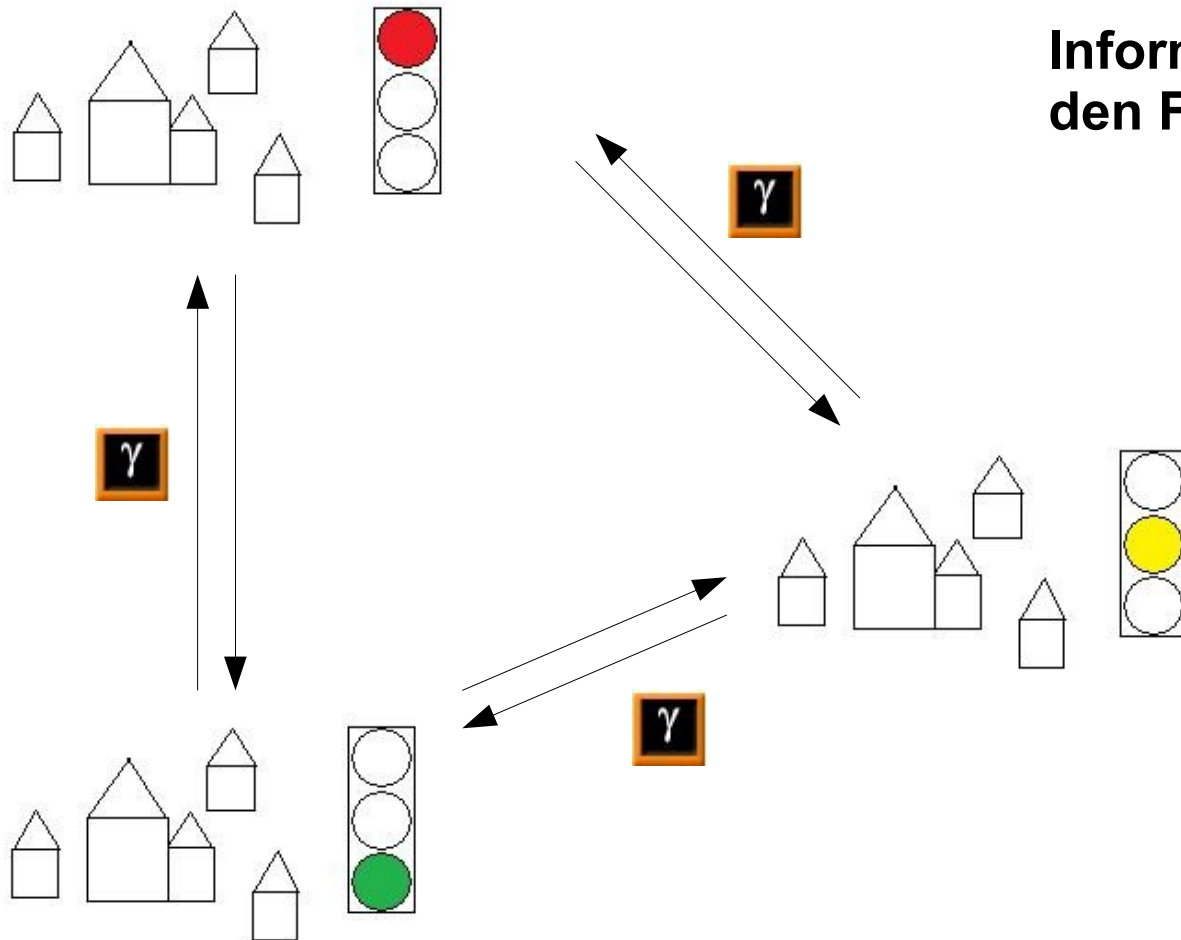
- Wie lassen sich trotzdem Unfälle vermeiden?





# 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  $\psi$  und  $A_\mu$

Term für das „freie“  
Feld  $A_\mu$

$A_\mu$  beschreibt „massenloses“ Vektorfeld mit folgender Transformation

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

Außerdem ist  $A_\mu$  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

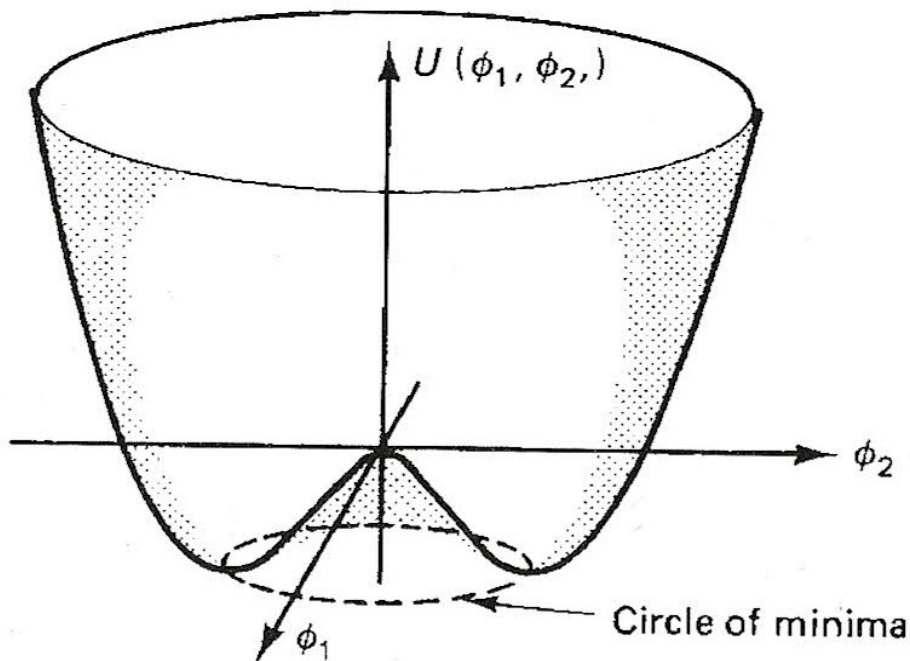
**Masse!**



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

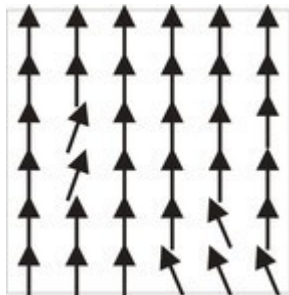
Einschub: Spontane Symmetriebrechung

Einfacheres Beispiel:  
Ferromagnet



Raumsymmetrie

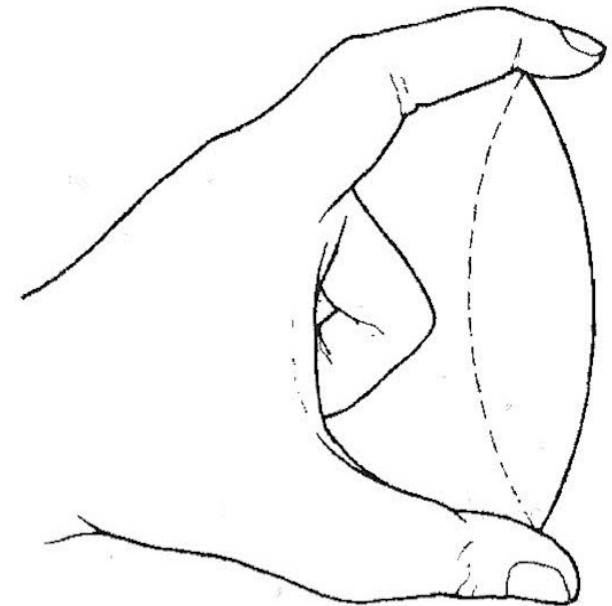
Kühlen unter  
Curie-Temperatur



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

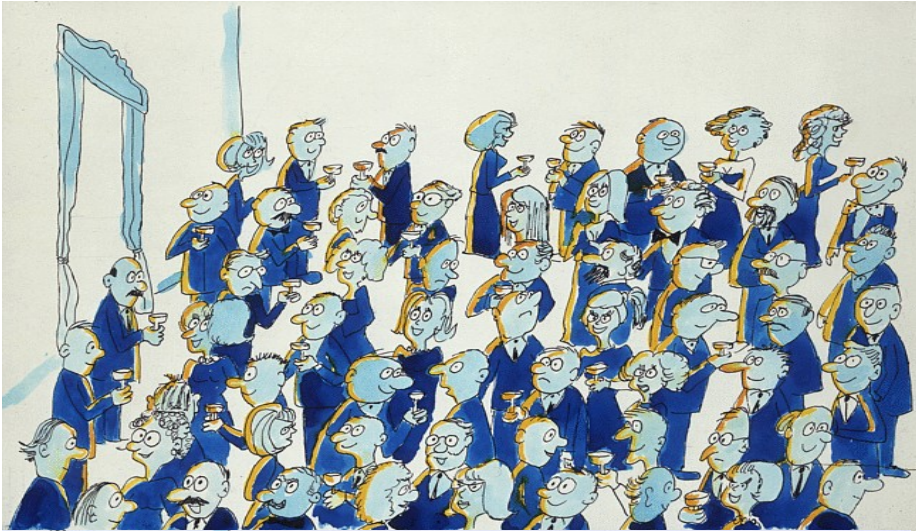
Kopplungsterm

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

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

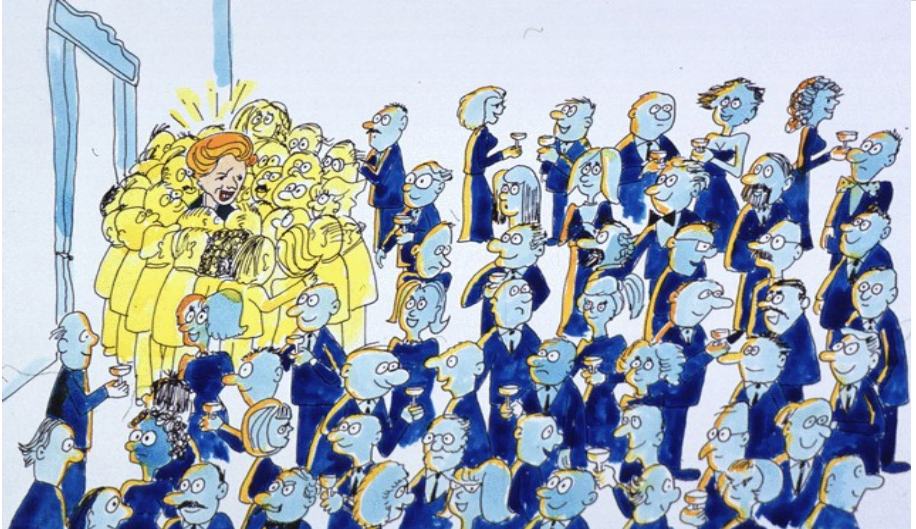
# Der Higgs-Mechanismus

## Analogon für den englischen Wissenschaftsminister



- Cocktailparty mit homogen verteilten Gästen

Dies entspricht dem Higgs-Feld

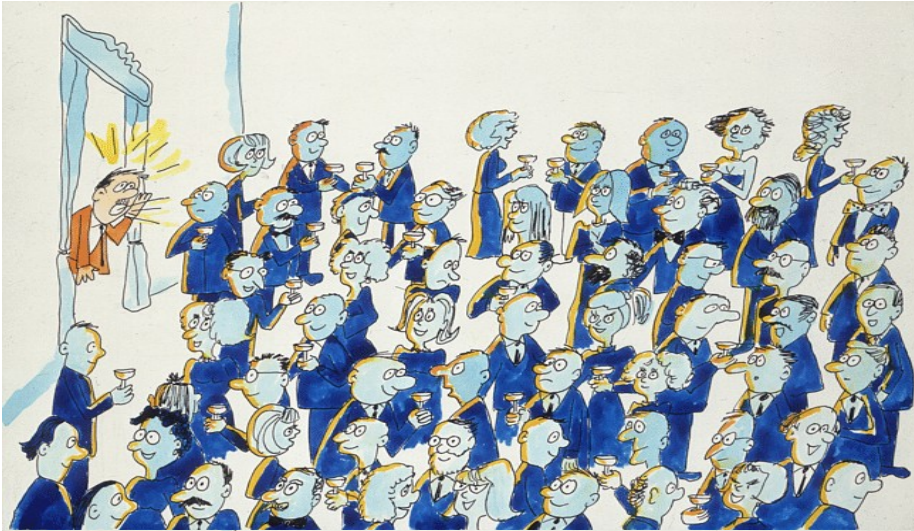


- VIP (Margaret Thatcher) betritt den Raum
- Partygäste versammeln sich um die VIP

So kann das Higgs-Feld den Elementarteilchen ihre Masse verleihen

# Der Higgs-Mechanismus

## Analogon für den englischen Wissenschaftsminister



- Ein Gerücht wird gestreut

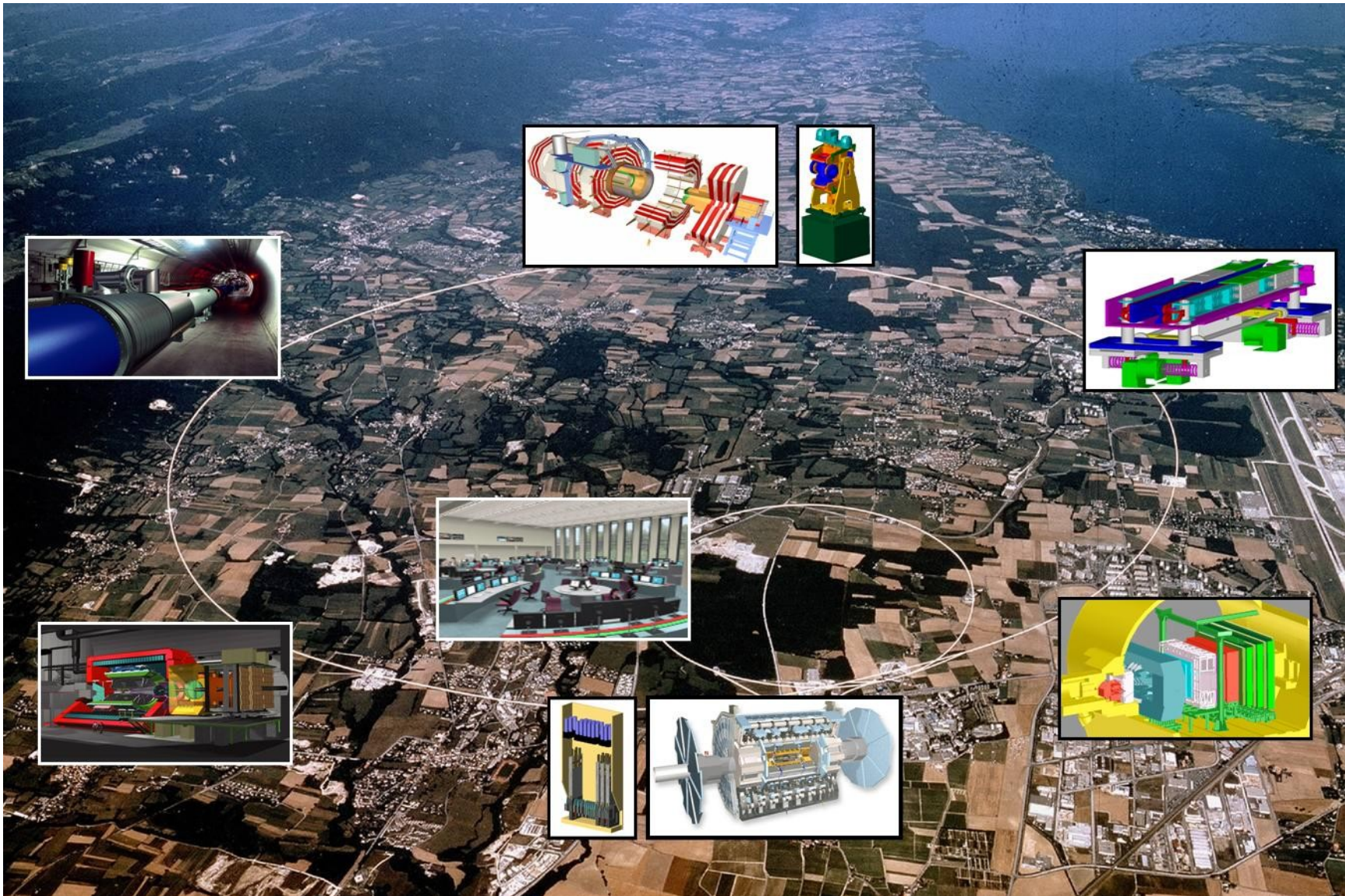
Selbstwechselwirkung des Higgs-Feldes



- Das Gerücht „bewegt“ sich durch den Raum

Das Higgs-Teilchen

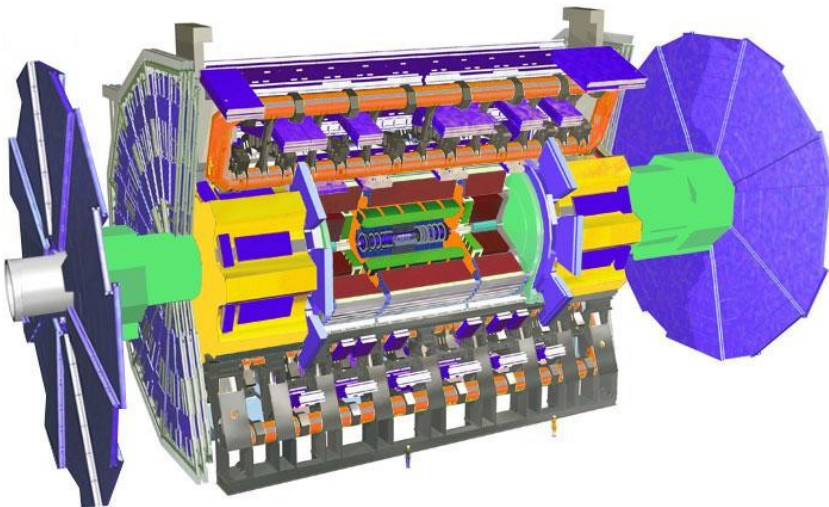
# Die Suche nach dem Higgs-Boson am LHC



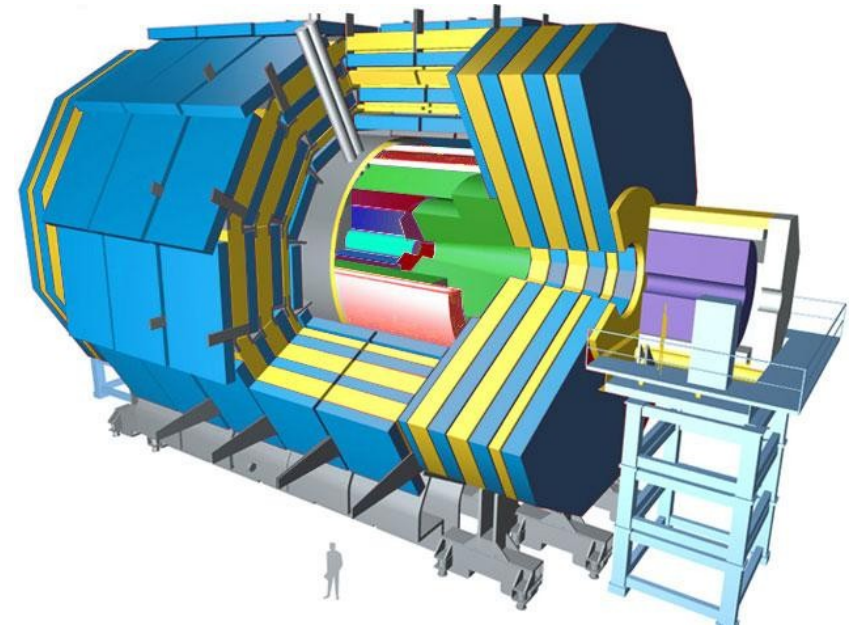
# Die Suche nach dem Higgs-Boson am LHC

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     $\sigma$  : 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

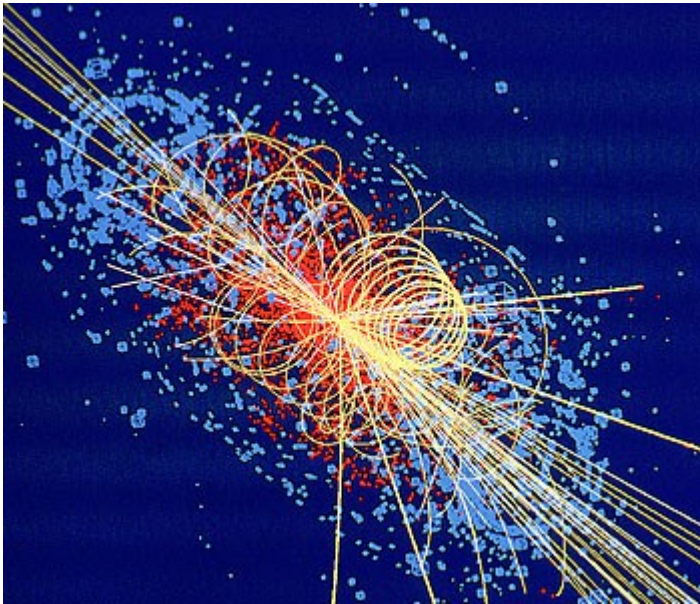
sicher:  $m_{\text{higgs}} < 1 \text{ TeV}$

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

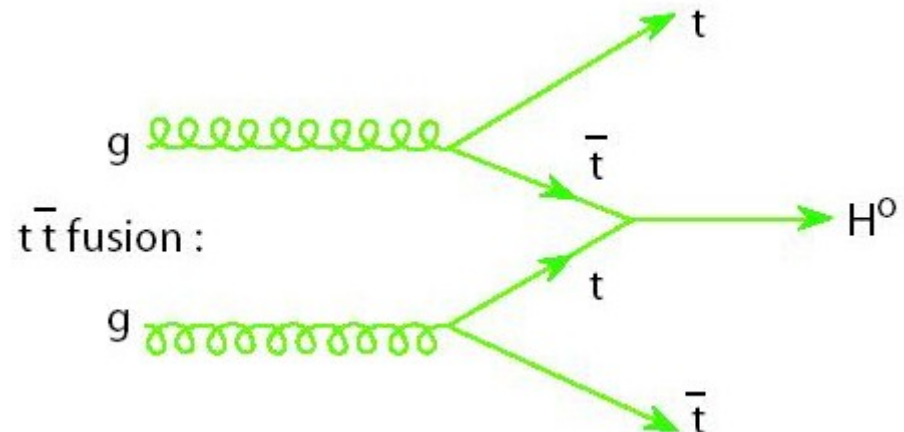
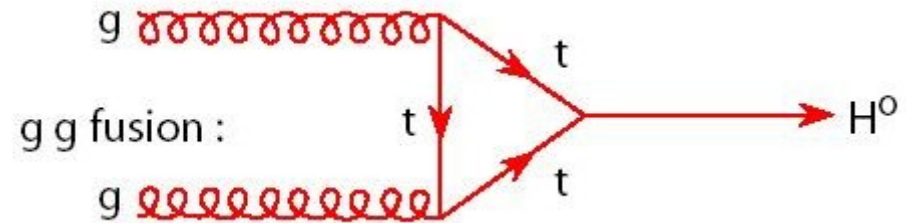
**Wenn die Massenvorraussagen zutreffen werden am LHC auf jeden  
Fall Higgs-Bosonen erzeugt!**

# Die Suche nach dem Higgs-Boson am LHC

Wie werden die Higgs-Teilchen am LHC erzeugt?



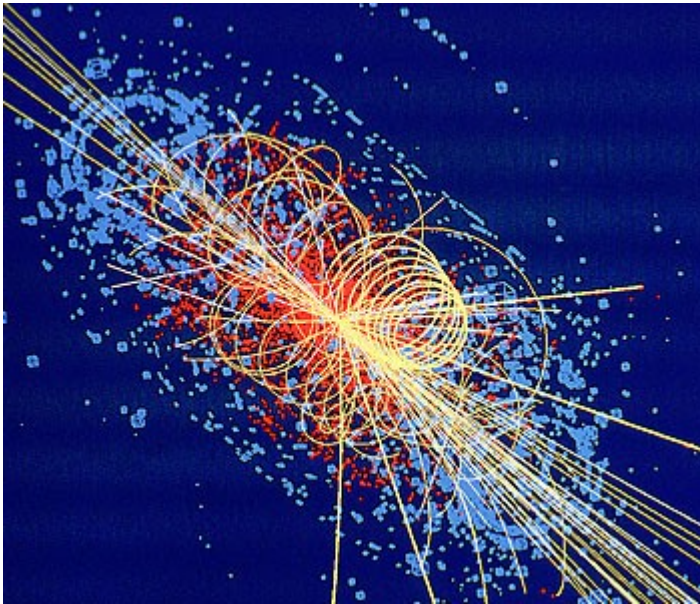
Quelle: bbc.co.uk



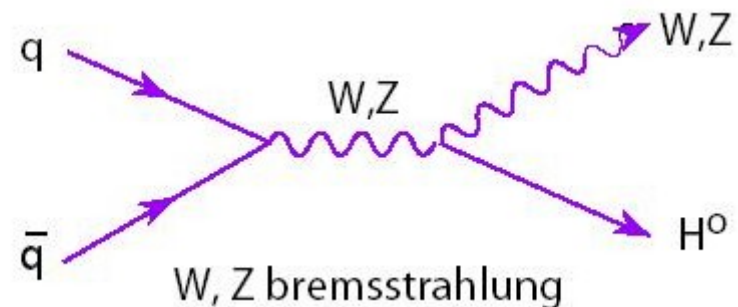
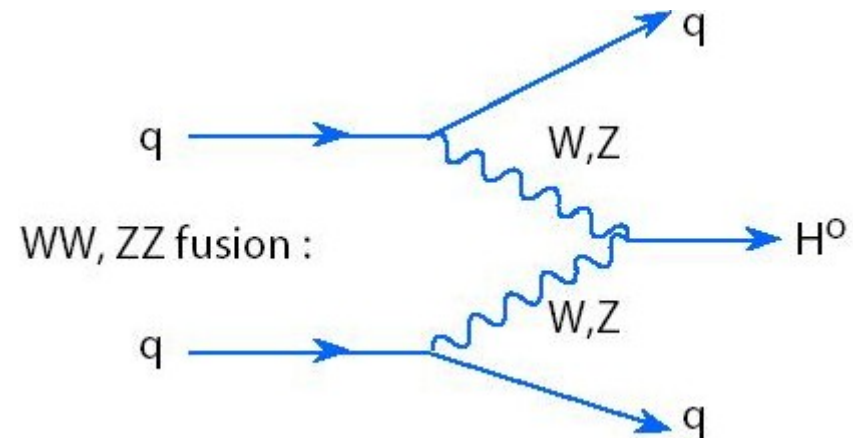
Quelle: [www.hep.ph.ic.ac.uk/cms/physics/higgs.html](http://www.hep.ph.ic.ac.uk/cms/physics/higgs.html)

# Die Suche nach dem Higgs-Boson am LHC

Wie werden die Higgs-Teilchen am LHC erzeugt?



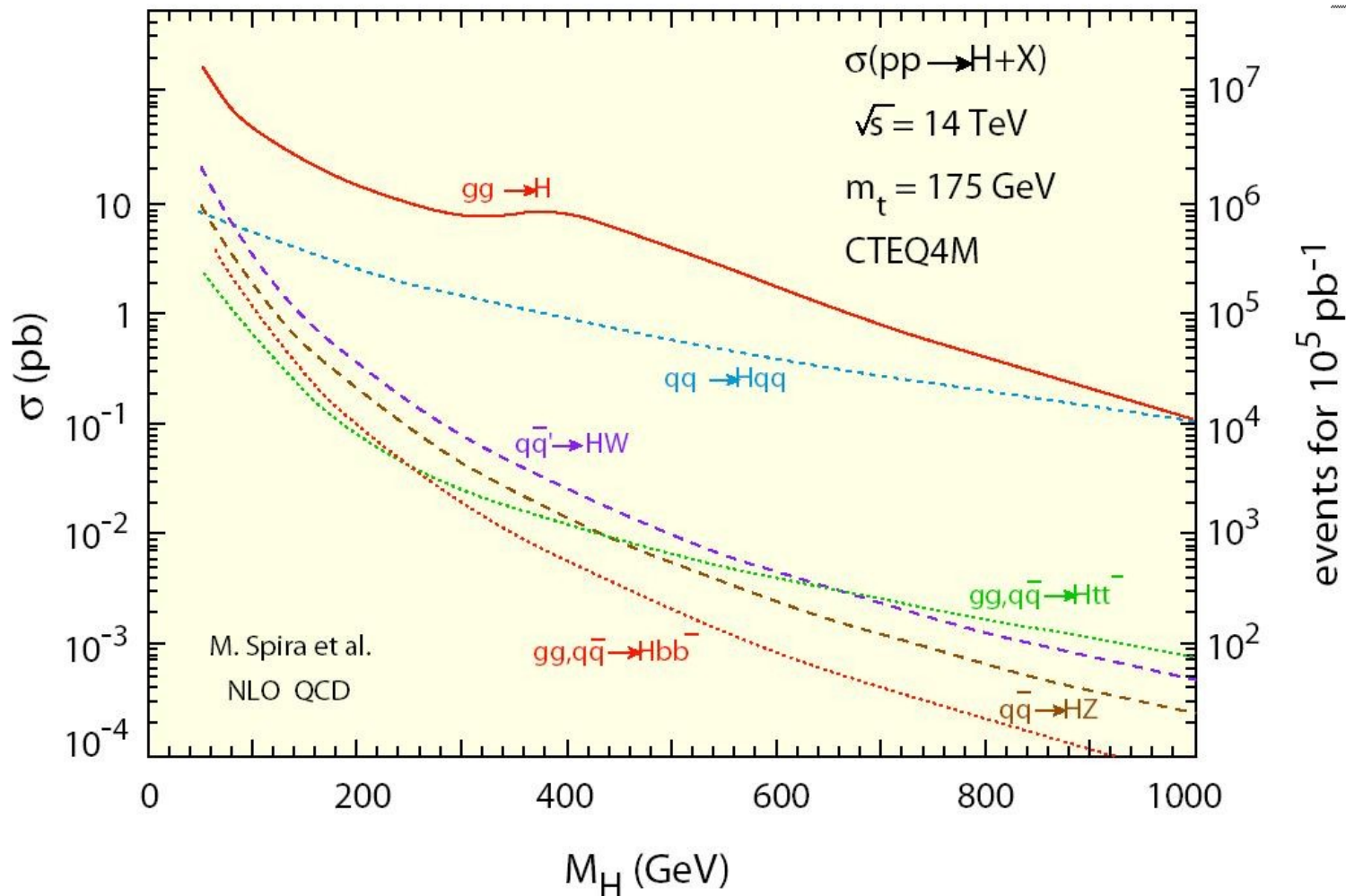
Quelle: [bbc.co.uk](http://bbc.co.uk)



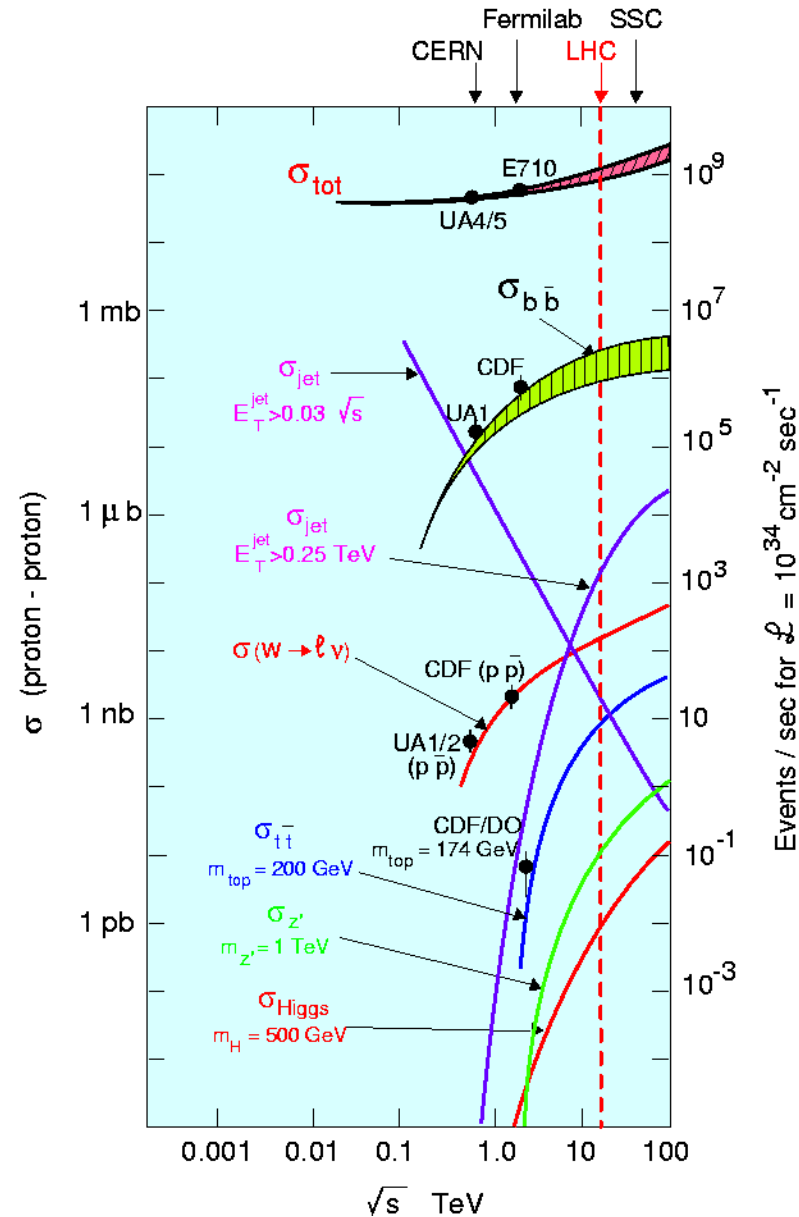
Quelle: [www.hep.ph.ic.ac.uk/cms/physics/higgs.html](http://www.hep.ph.ic.ac.uk/cms/physics/higgs.html)

# Die Suche nach dem Higgs-Boson am LHC

Wie werden die Higgs-Teilchen am LHC erzeugt?

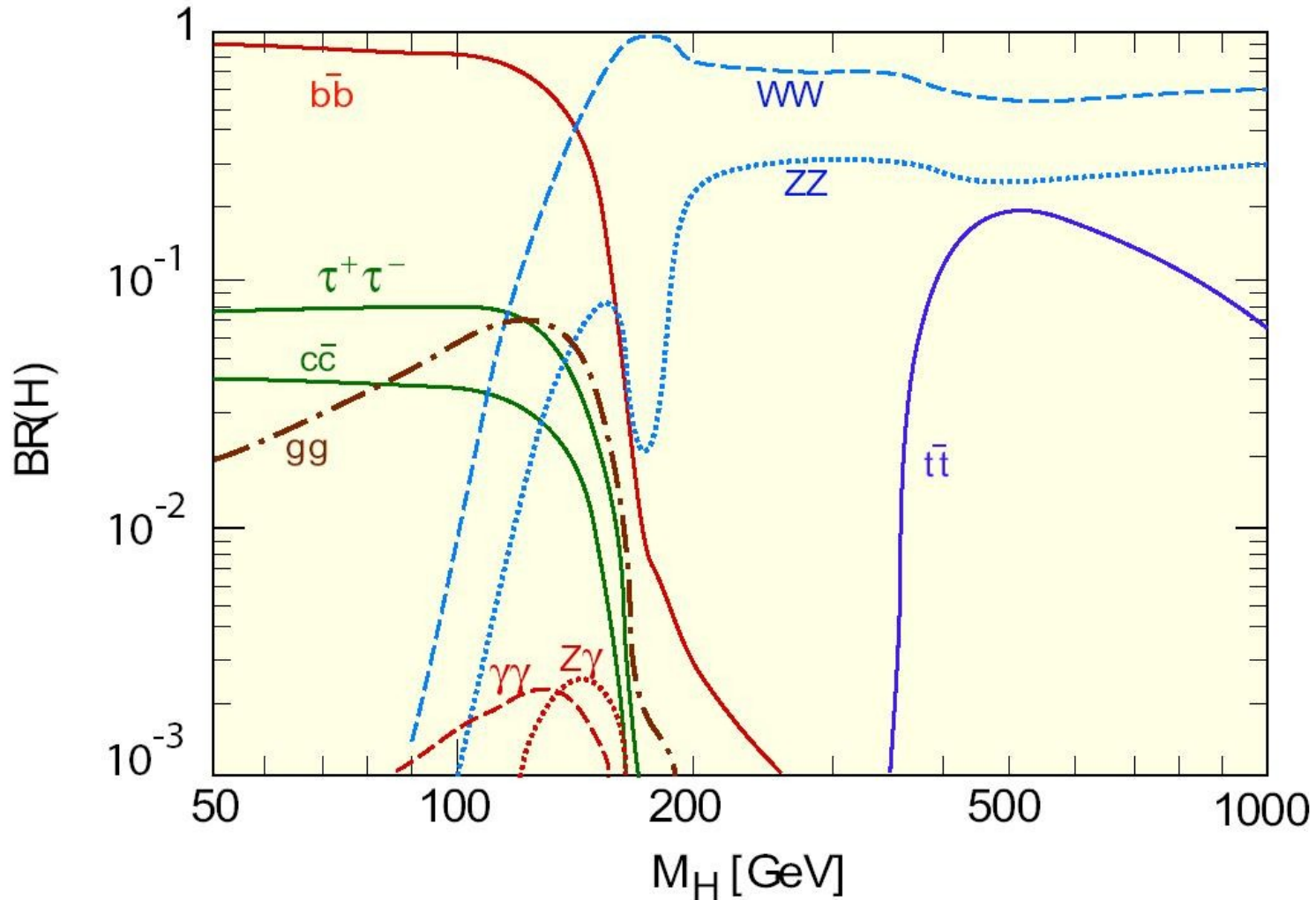


# Die Suche nach dem Higgs-Boson am LHC



# 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:

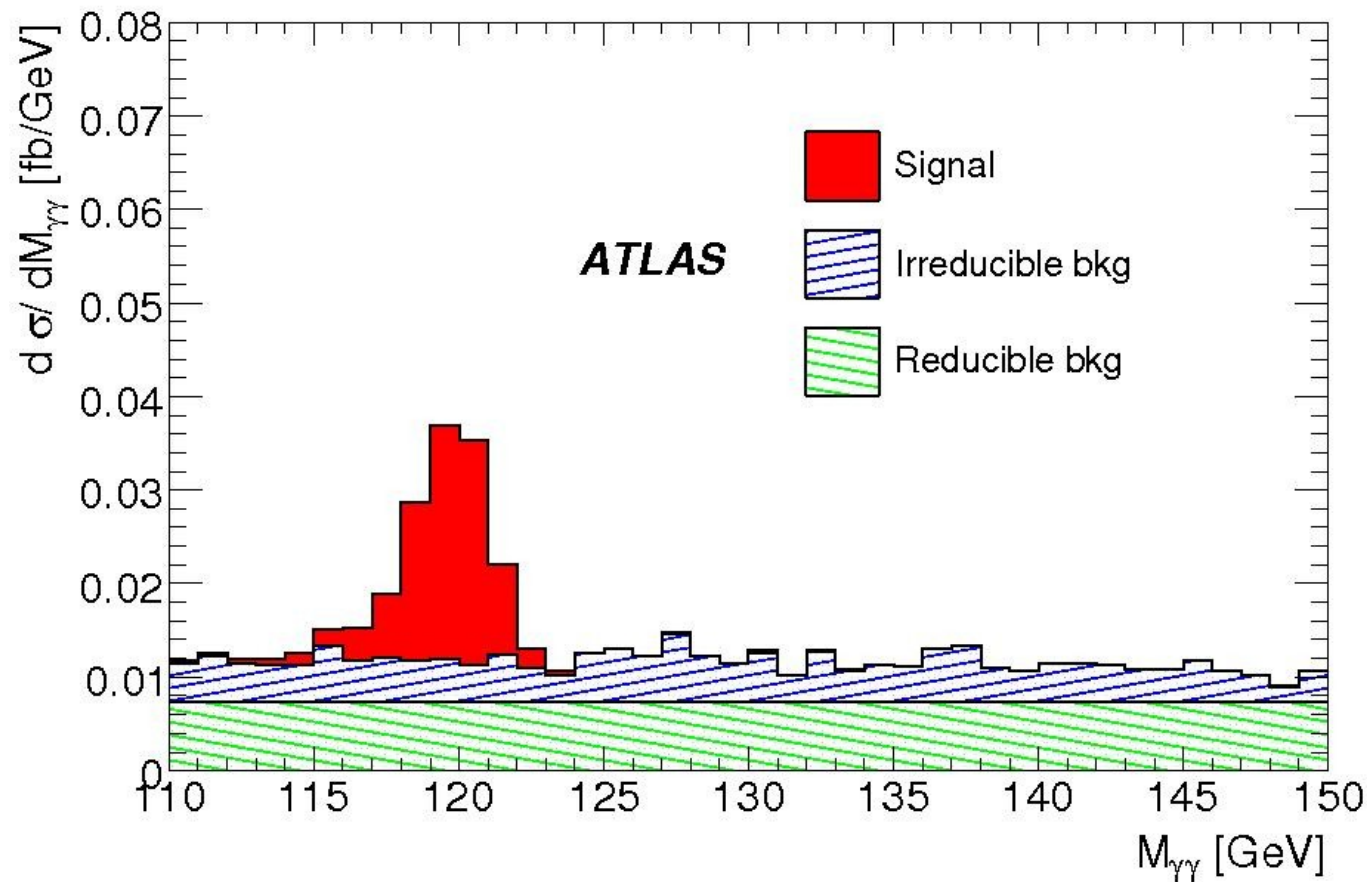
- Gute Auflösung der EM-Kalorimeter
- Rekonstruktion der einzelnen Photonen



# 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

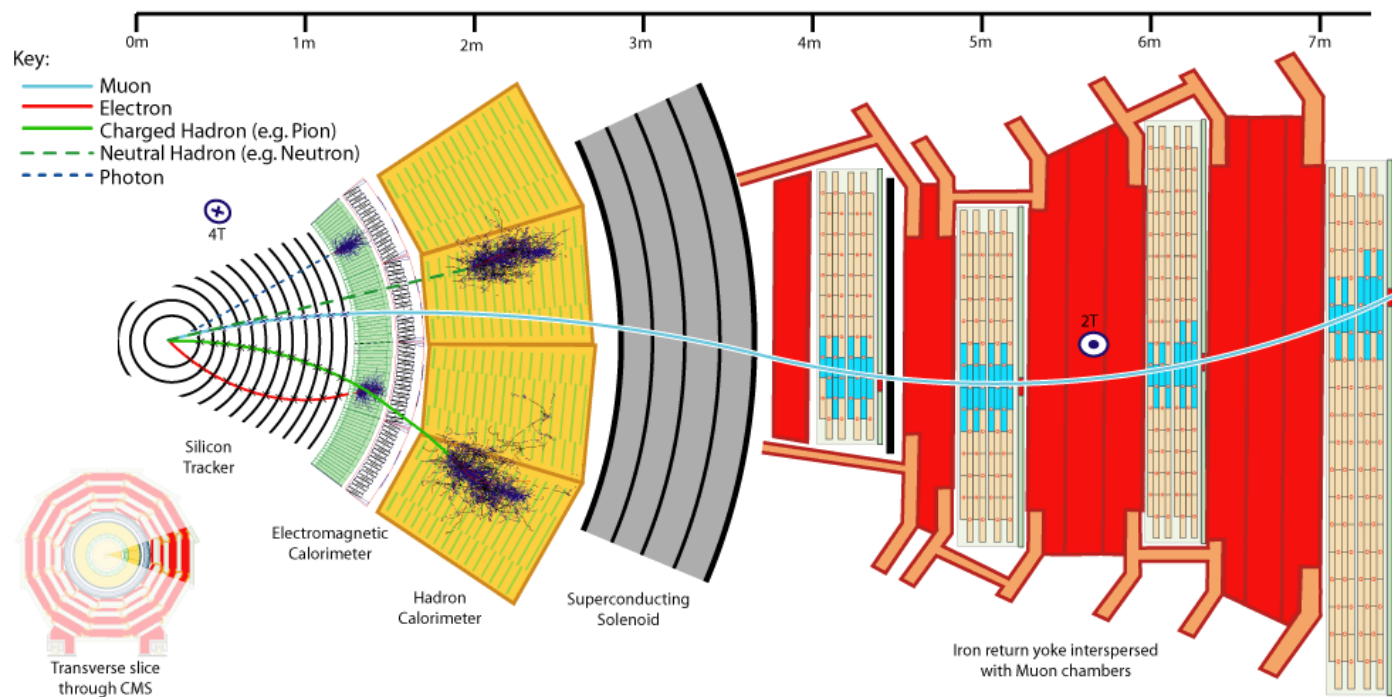
Herausforderungen an die Detektoren:

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

# Die Suche nach dem Higgs-Boson am LHC

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

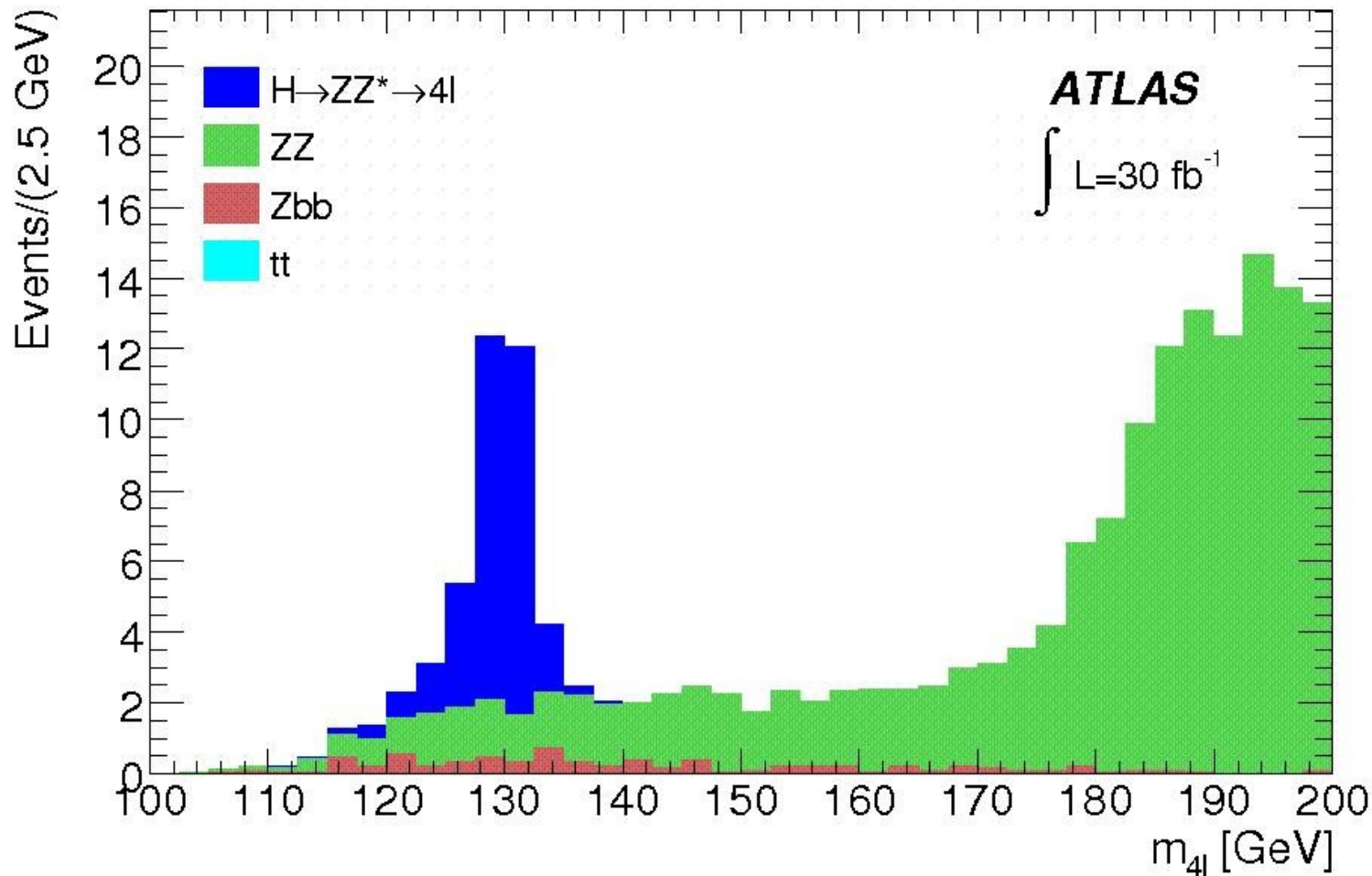
- „Golden“ aufgrund sehr niedrigen Untergrunds
- Erfordert jedoch zuverlässigen Nachweis von Myonen



# Die Suche nach dem Higgs-Boson am LHC

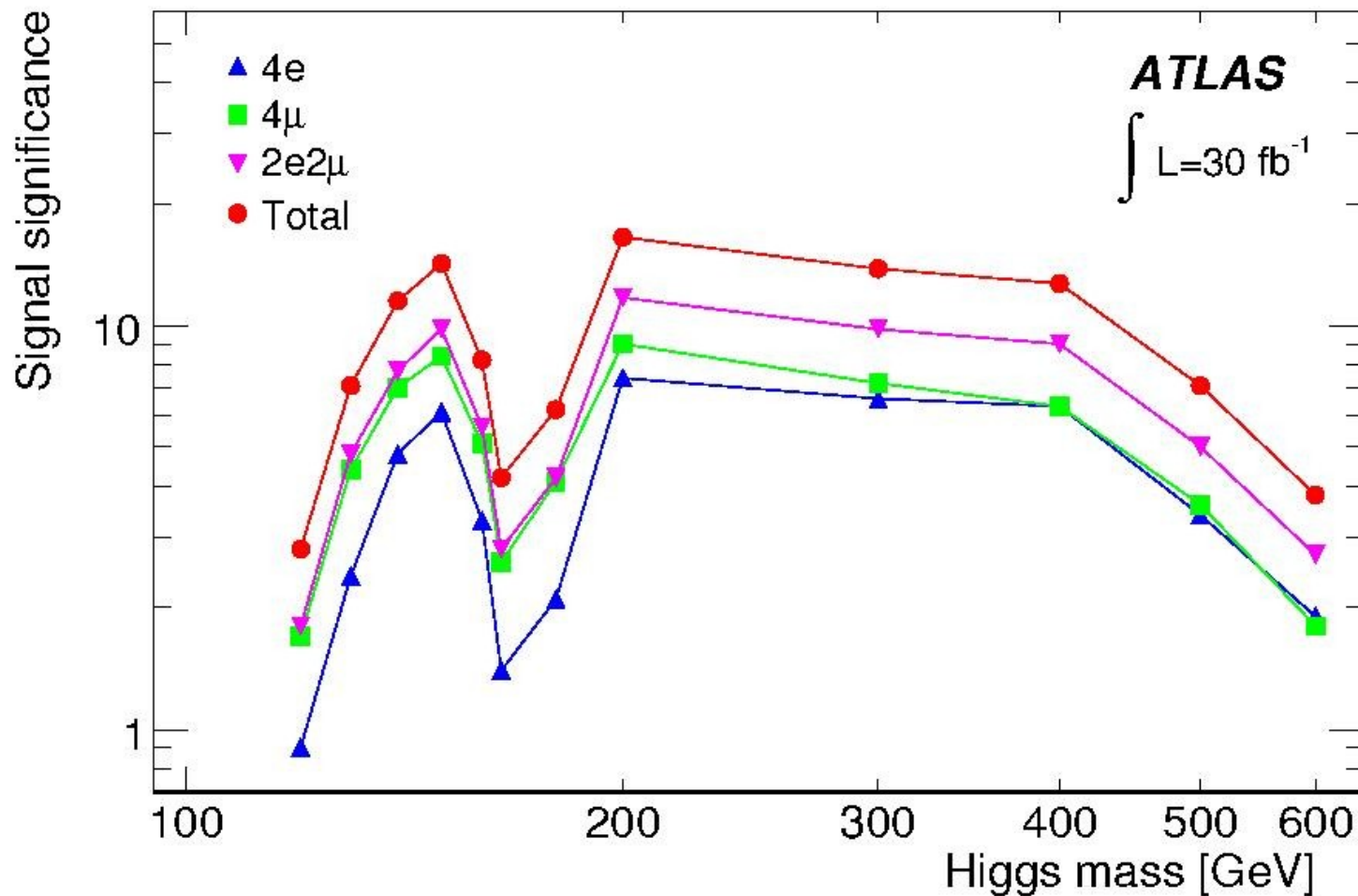
$$H \rightarrow ZZ \rightarrow l^+ l^- l^+ l^-$$

Ziel: Peak bei Masse des Higgs-Bosons



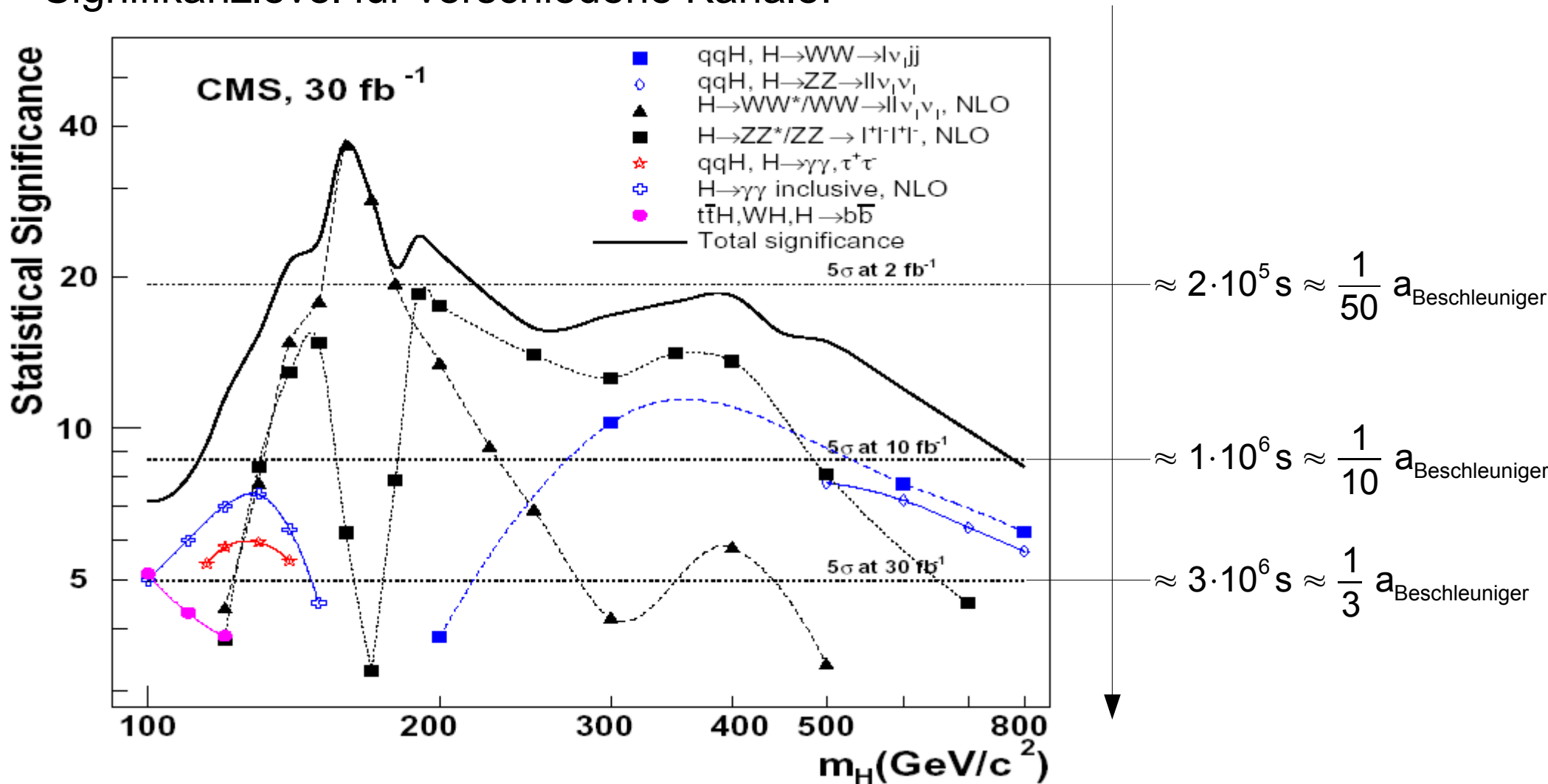
# Die Suche nach dem Higgs-Boson am LHC

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



# 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](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](http://pauli.uni-muenster.de/tp/fileadmin/lehre/vorlesungen/heitger/einfuehrung_sm_ws06.pdf))
- Für Bilder und Grafiken siehe individuelle Quellenangaben