

Seminarvortrag am 10.12.2007

Scheinseminar Astro- und Teilchenphysik WS 07/08

Friedrich-Alexander-Universität  
Erlangen-Nürnberg



Christopher Braun

Betreuer: Prof. Dr. K. Rith

Die Higgs-Suche am LHC

1. Der Higgs-Mechanismus
2. Das Experiment: LHC / CERN
3. Nachweis des Higgs-Bosons am LHC



# 1 Der Higgs-Mechanismus

## 1.1 Modelvorstellung



### Das “Celebrity at party”-Model



Higgs-Hintergrundfeld  
erfüllt den Raum



Ein Teilchen  
im Higgs-Feld...



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

Prof. D. Miller  
UC London

⇒ Teilchenmasse wird durch die Stärke der Wechselwirkung mit dem Higgs-Feld festgelegt.

# 1 Der Higgs-Mechanismus

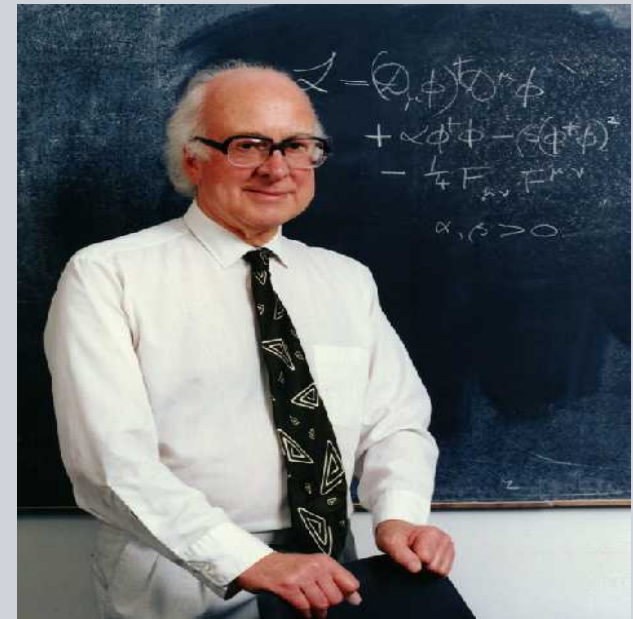
## 1.2 Standard Model und Erweiterungen



Bis dahin noch keine Erklärung für die Herkunft der Teilchenmassen.

→ Erweiterung des SM durch:

- Spontane Symmetriebrechung
- Eichtheorie



[teachers.web.cern.ch/teachers](http://teachers.web.cern.ch/teachers)

VOLUME 13, NUMBER 16

PHYSICAL REVIEW LETTERS

19 OCTOBER 1964

BROKEN SYMMETRIES AND THE MASSES OF GAUGE BOSONS

Peter W. Higgs

Tait Institute of Mathematical Physics, University of Edinburgh, Edinburgh, Scotland

(Received 31 August 1964)

# 1.2 Standard Model und Erweiterungen

## 1.2.1 Spontane Symmetriebrechung



- QFT: Systeme werden durch ihre Lagrangefunktion /-dichte beschrieben

$$L = T - V ; L = \int d^3x \mathcal{L}$$

T = kinetische Energie , V = Potential ,  $\mathcal{L}$  = Lagrangedichte

- Annahme: Selbstwechselwirkung eines reellen Skalarfeldes  $\Phi$ :

$$\text{Higgs-Potential: } V = \mu^2|\Phi|^2 + \lambda|\Phi|^4$$

$$\Rightarrow L = \partial_\mu \Phi \partial^\mu \Phi - \mu^2|\Phi|^2 - \lambda|\Phi|^4$$

mit  $\mu^2|\Phi|^2 = \text{Massesterm}$  ,  $\lambda|\Phi|^4 = \text{Selbst-WW-Term}$

# 1.2 Standard Model und Erweiterungen

## 1.2.1 Spontane Symmetriebrechung



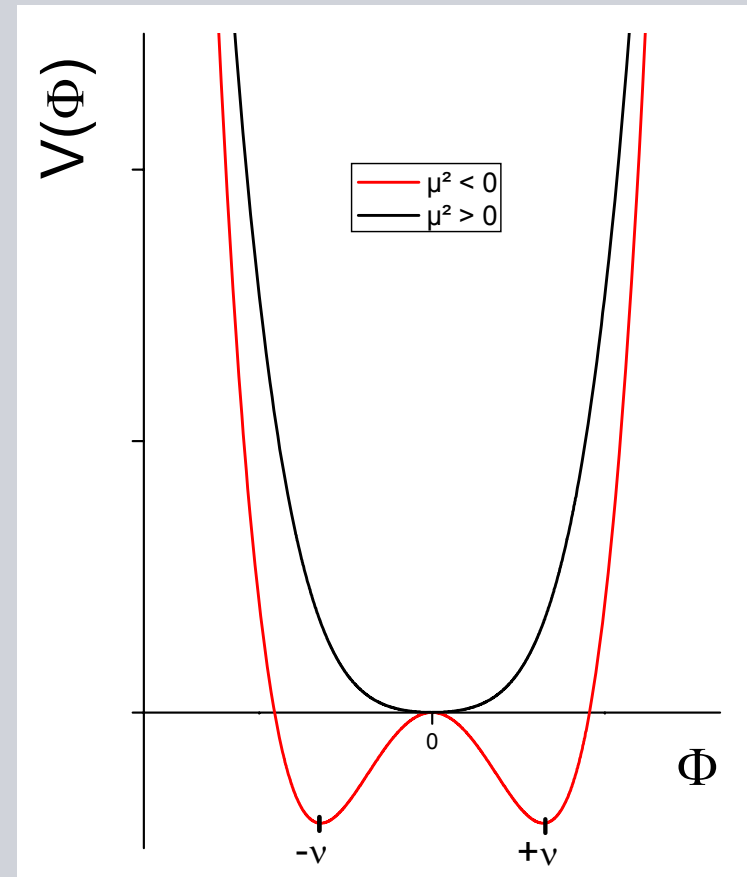
Diskussion des Higgs-Potentials:

- für  $\mu^2 > 0$  und  $\lambda > 0$   
 $\exists$  ein definierter Grundzustand

- für  $\mu^2 < 0$  und  $\lambda > 0$   
 $\exists$  zwei mögliche Grundzustände  $\pm v$

$$v = \pm \sqrt{\frac{-\mu^2}{\lambda}} \quad v = \left(\sqrt{2}G_F\right)^{-1/2} = 246.22 \text{ GeV}$$

$G_F$  = Fermi-Konstante



Higgs-Potential:  $V = m^2|\Phi|^2 + \lambda|\Phi|^4$

→ System entscheidet sich 'spontan' für einen der beiden Grundzustände  
⇒ Symmetrie ist gebrochen

# 1.2 Standard Model und Erweiterungen

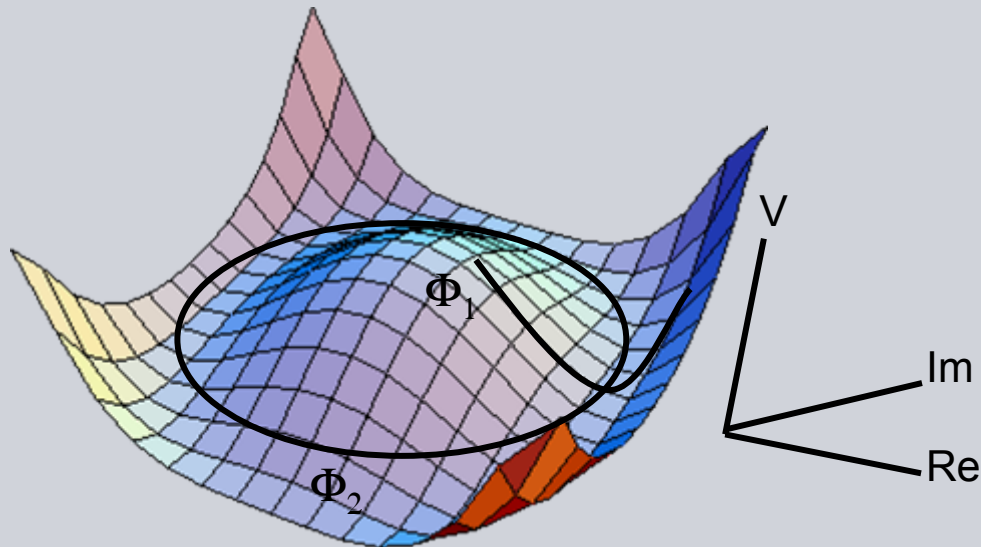
## 1.2.1 Spontane Symmetriebrechung



Einführung eines komplexen Skalarfeldes

$$\Phi = \frac{1}{\sqrt{2}} (\Phi_1 + i\Phi_2)$$

Nun existieren unendlich viele, energetisch entartete Grundzustände  
→ Eichsymmetrie der Wechselwirkung im Grundzustand nicht mehr realisiert



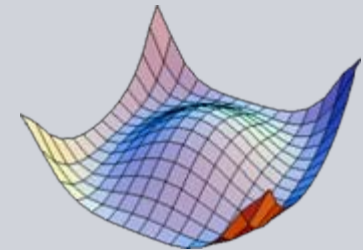
# 1.2 Standard Model und Erweiterungen

## 1.2.1 Spontane Symmetriebrechung



Nun entwickelt man die Lagrangedichte um Punkte auf dem Kreis der Minima, dann ist:

- $\Phi_2$  das Skalarfeld eines Teilchens mit der Masse 0  
⇒ Goldstone-Boson



- $\Phi_1$  das Skalarfeld eines Teilchens mit der Masse  $m = \sqrt{-2\mu^2} = \sqrt{2\lambda v^2}$   
⇒ Higgs-Boson

⇒ Higgs-Boson ist Quant des Higgs-Feldes, vgl.  $\gamma$  und e.m. Feld  
⇒ Allgemeinen gilt: Für jede Symmetriebrechung kommt ein Goldstone-Boson hinzu

# 1.2 Standard Model und Erweiterungen

## 1.2.2 Eichtheorie



$$\Phi = \frac{1}{\sqrt{2}} (\Phi_1 + i\Phi_2)$$

- Lagrangefunktion des komplexen Skalarfeldes besitzt bereits eine globale U(1) Eichinvarianz

$$\Phi \rightarrow e^{i\theta_0} \Phi$$

→ Lokale Eichinvarianz auch möglich?

$$\Phi(x) \rightarrow e^{-i\theta(x)} \Phi(x) \quad ; \quad A_\mu(x) \rightarrow A_\mu(x) + e^{-1} \partial_\mu \theta(x)$$

Auch nach der lokalen Eichung erhält man wieder ein Goldstone- und ein Higgs-Boson als Lösung

Nun aber massives Eichfeld  $A_\mu$



# 1.2 Standard Model und Erweiterungen

## 1.2.2 Eichtheorie



Erweiterung zur elektroschwachen Feldtheorie:

- e.m. Feldstärketensor  $F_{\mu\nu}$  in der Lagrangefunktion berücksichtigen
- Skalarfeld mit vier Komponenten

$$\Phi = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{pmatrix} \chi_1 + i\psi_1 \\ \chi_2 + i\psi_2 \end{pmatrix}$$

Erweiterung führt zu:

- Isospin-Triplett  $W^+, W^-, W^0$  (Ladung  $g$ )
- Isospin-Singulett  $B^0$  (Ladung  $g'$ )
- Linearkombinationen von  $W^0$  und  $B^0$  ergeben Felder  $Z^0$  und  $\gamma$

⇒ elektroschwache Vereinheitlichung

# 1 Der Higgs-Mechanismus

## 1.2 Standard Model und Erweiterungen



Vollständige Lagrangedichte des Higgs-Bosons

$$\mathcal{L} = (D_\mu \phi)^\dagger (D^\mu \phi) + m \phi^\dagger \phi - \lambda (\phi^\dagger \phi)^2 - \frac{1}{4} F_{\mu\nu} F^{\mu\nu}$$

mit kovariantem Ableitungsoperator

$$D_\mu \phi = \left[ \partial_\mu + igW_\mu + g' \frac{Y}{2} B_\mu \right] \phi$$

Kopplungsterme an schwache und e.m. Wechselwirkung

mit

$Y$  = Hyperladung

# 1 Der Higgs-Mechanismus

## 1.2 Standard Model und Erweiterungen



Nach analogen Vorgehen, also:

- 1) spontane Symmetriebrechung für  $\lambda > 0$  und  $\mu^2 < 0$
- 2) globale und lokale Eichung

Erhält man:

- Massenterme für die massiven Eichbosonen  $W^+, W^-$  und  $Z^0$

$$m_{W^\pm} = \frac{g\nu}{2} \quad ; \quad m_Z = \sqrt{g^2 + g'^2} \frac{\nu}{2}$$

$$\text{mit } \nu = 246 \text{ GeV}$$

- Massenterm für das Higgs-Boson

$$m_H = \sqrt{2\lambda\nu^2}$$

wobei  $\lambda$  freier Parameter im SM ist.

- Symmetrie des e.m. Eichfeldes  $A_\mu$  bleibt ungebrochen  $\rightarrow m_\gamma=0$

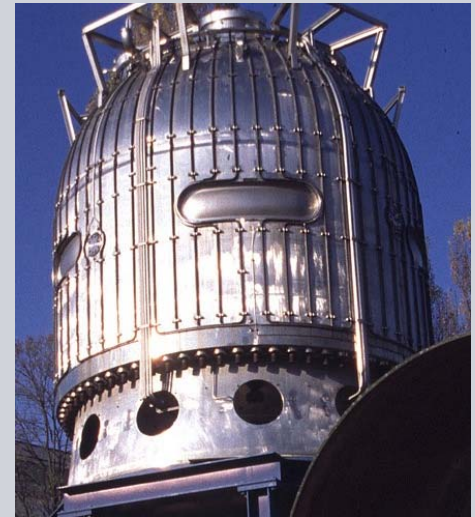
# 1 Der Higgs-Mechanismus

## 1.3 Experimentelle Bestätigung des Standard Models



Bislang experimentell nachgewiesen:

- $W^+$  und  $W^-$ : 1983 am SPS / CERN  
 $m_W = 80.403 \pm 0.029 \text{ GeV}$  ;  $m_{W^+} - m_{W^-} = -0.2 \pm 0.6 \text{ GeV}$
- $Z^0$ : 1973 - neutrale Ströme in Blasenkammer  
BEBC / CERN  
1983 - Masse des  $Z^0$  SPS / CERN (NP 1984)  
 $m_Z = 91.1876 \pm 0.0021 \text{ GeV}$



Big European Bubble Chamber

Noch nachzuweisen:

- $H^0$ : 20?? Am LHC am CERN (Theorie von Peter W. Higgs 1964)



## 2 Das Experiment: LHC

### 2.1 Allgemeines zum LHC



## LHC = Large Hadron Collider

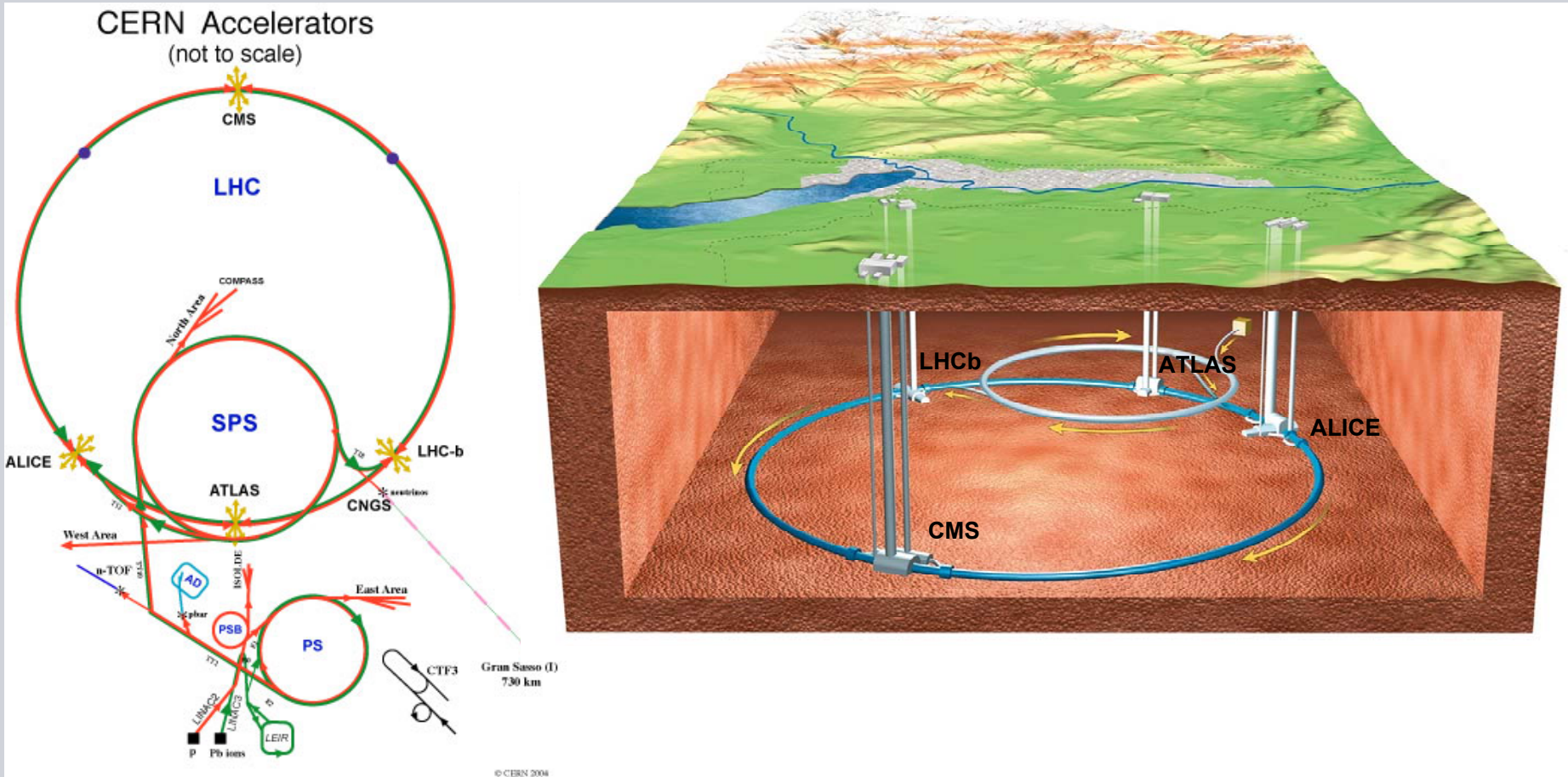
- Proton-Proton Ringbeschleuniger/-collider im Tunnel des ehemaligen LEP ( $e^-e^+$ -Maschine) am CERN nahe Genf
- 14 TeV Schwerpunktsenergie  $E_{CM}$  (2 x 7 TeV) [LEP-II 200 GeV]
- 27 km Tunnelumfang, in 70 – 100m Tiefe
- 4 Experiment in 4 unterirdischen Hallen
  - ATLAS: pp-Physik
  - CMS: pp-Physik
  - ALICE: Pb-Pb Kollisionen ; Untersuchung des QGPs
  - LHCb: b-Physik ; CP-Violation



Panoramabild über CERN, Genfer See, Alpen

# 2 Das Experiment: LHC

## 2.1 Allgemeines zum LHC



Kette von Vorbeschleunigern: Linac2, PSB, PS, SPS

Schema LHC

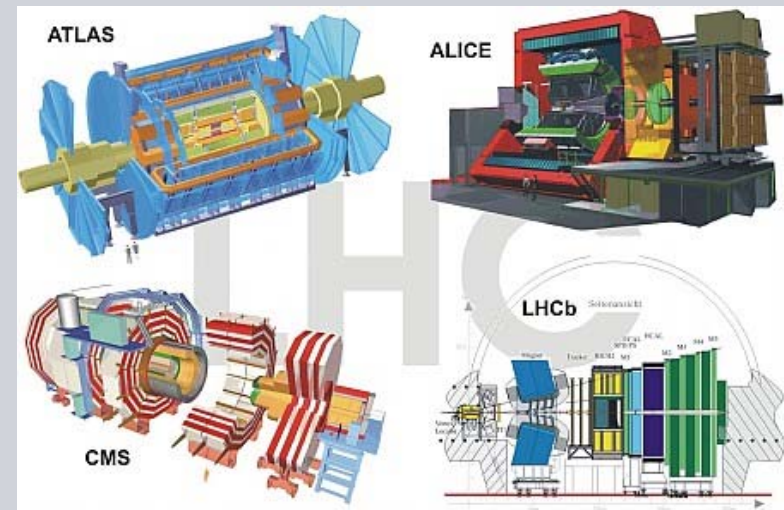
# 2 Das Experiment: LHC

## 2.2 Eckdaten des LHC



Technische Eckdaten:

- 1232 supraleitende Dipolmagnete (15 m,  $B = 8.3 \text{ T}$ ,  $T = 1.9 \text{ K}$ )
- 8 supraleitende HF-Kavitäten (Beschleunigungsgradient von  $5 \text{ MV/m}$ )
- Umlauffrequenz:  $f = 11.245 \text{ kHz}$
- 362 MJ gespeicherte Energie pro Beam
- 2808 Bunches je Ring
- 25 ns (= 7.5 m) bunch Abstand
- $1.15 \times 10^{11}$  Protonen / bunch
- Synchrotron Strahlungsleistung:  $3.6 \times 10^3 \text{ W}$   
Energieverlust pro Umlauf  
 $\Delta E_{\text{LHC}} \approx 7 \text{ keV}$  ( $\Delta E_{\text{LEP}} \approx 10^5 \Delta E_{\text{LHC}}$ )
- größtes Tieftemperatur- und UHV-System weltweit





## 2.2 Eckdaten des LHC

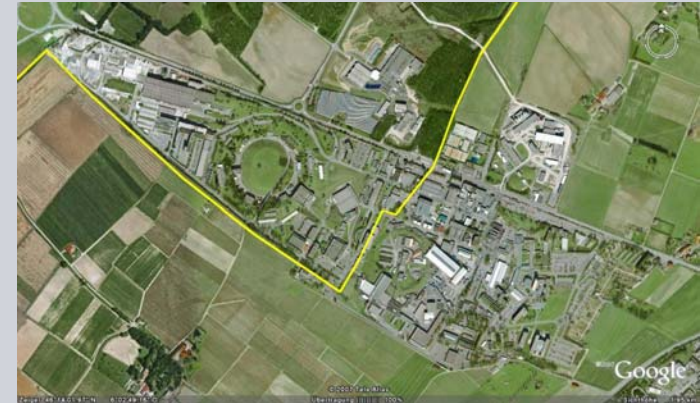
### 2.2.1 Luminosität



- Luminosität  $2 \times 10^{33} - 1 \times 10^{34} \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$

- Definition:

$$L = \frac{1}{4\pi} \frac{f N_1 N_2}{\sigma_x \sigma_y}$$



CERN

Mit  $\sigma_i$  = Strahldimension ;  $N_i$  = Teilchenanzahl pro Einzelstrahl

- Integrierte Luminosität  $\mathcal{L} \approx 30 \text{ fb}^{-1}$  in 2008 [300  $\text{fb}^{-1}$  (in 2014/2015)]
- Allgemein: Anzahl der erwarteten Events für einen gegebenen Prozess  $N$  mit geg. Wirkungsquerschnitt  $\sigma$

$$N = L \cdot \sigma$$

$N_{\text{LHC}} \sim 10^9$  pp-Kollisionen / s (Superposition von 23 Wechselwirkungen pro Bunch-Crossing)



## 2.2 Eckdaten des LHC

### 2.2.2 Inbetriebsetzung



- April 08: Alle technischen Systeme für den 7 TeV-Betrieb funktionsfähig und Schließung des Tunnels und der Hallen
- Mai 08: Aufnahme des Strahlbetriebs
- Juli 08: Erste Kollisionen bei 14 TeV



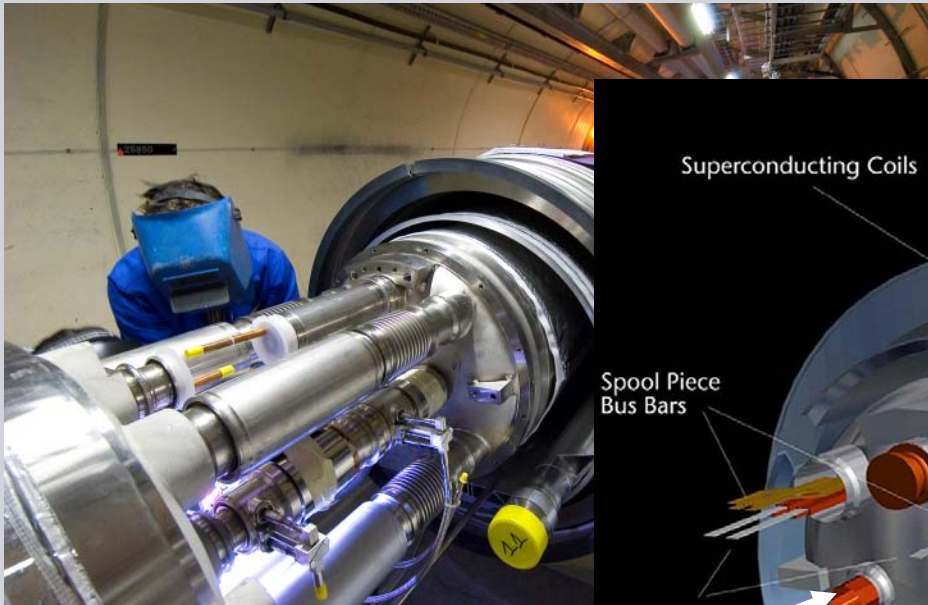
Blick in den Tunnel



Herablassen der letzten Magnetstruktur

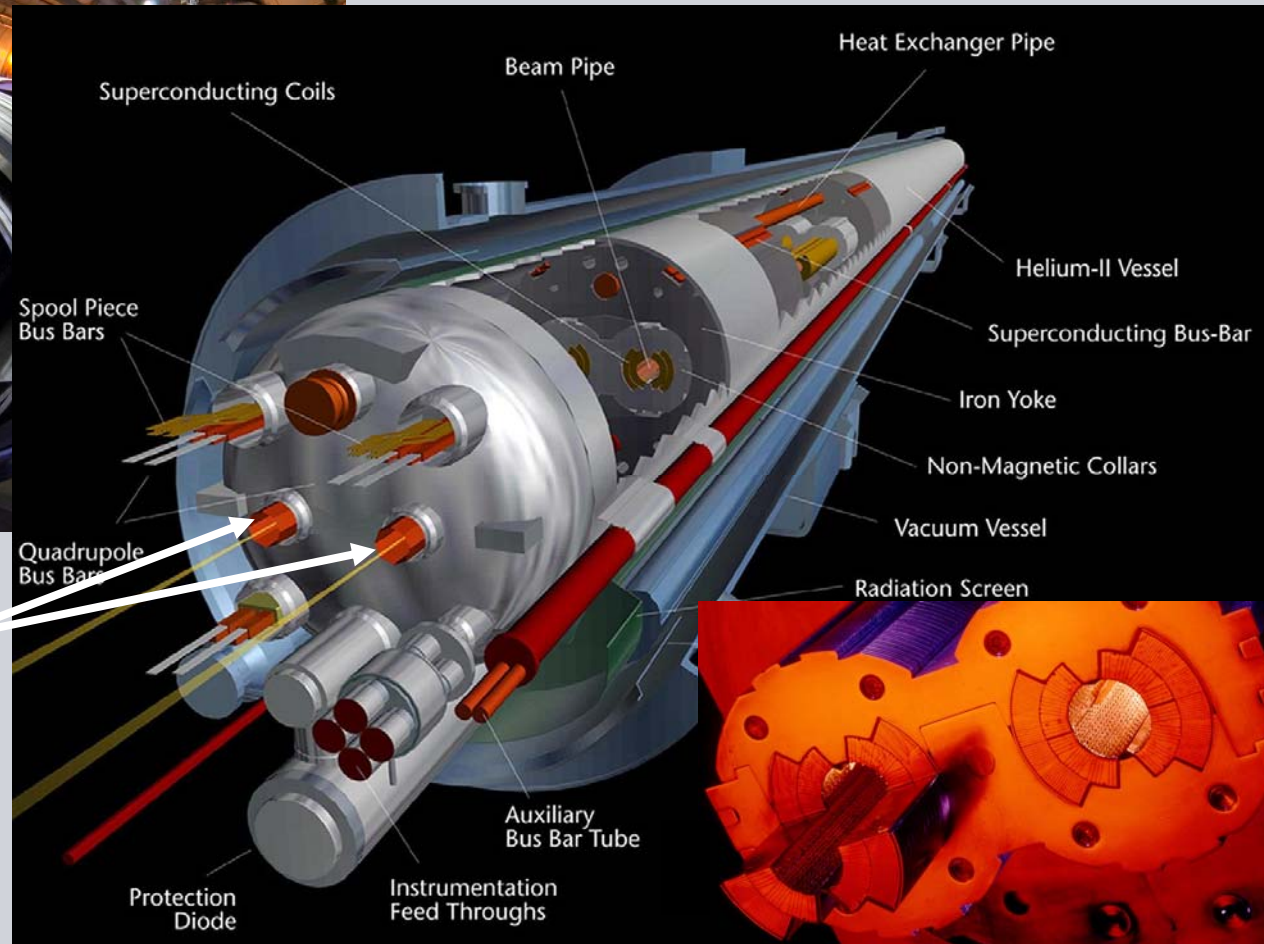
# 2.2 Eckdaten des LHC

## 2.2.3 Dipolmagnete



Verbindung zwischen  
zwei Magnetstrukturen

Protonen-  
Strahl



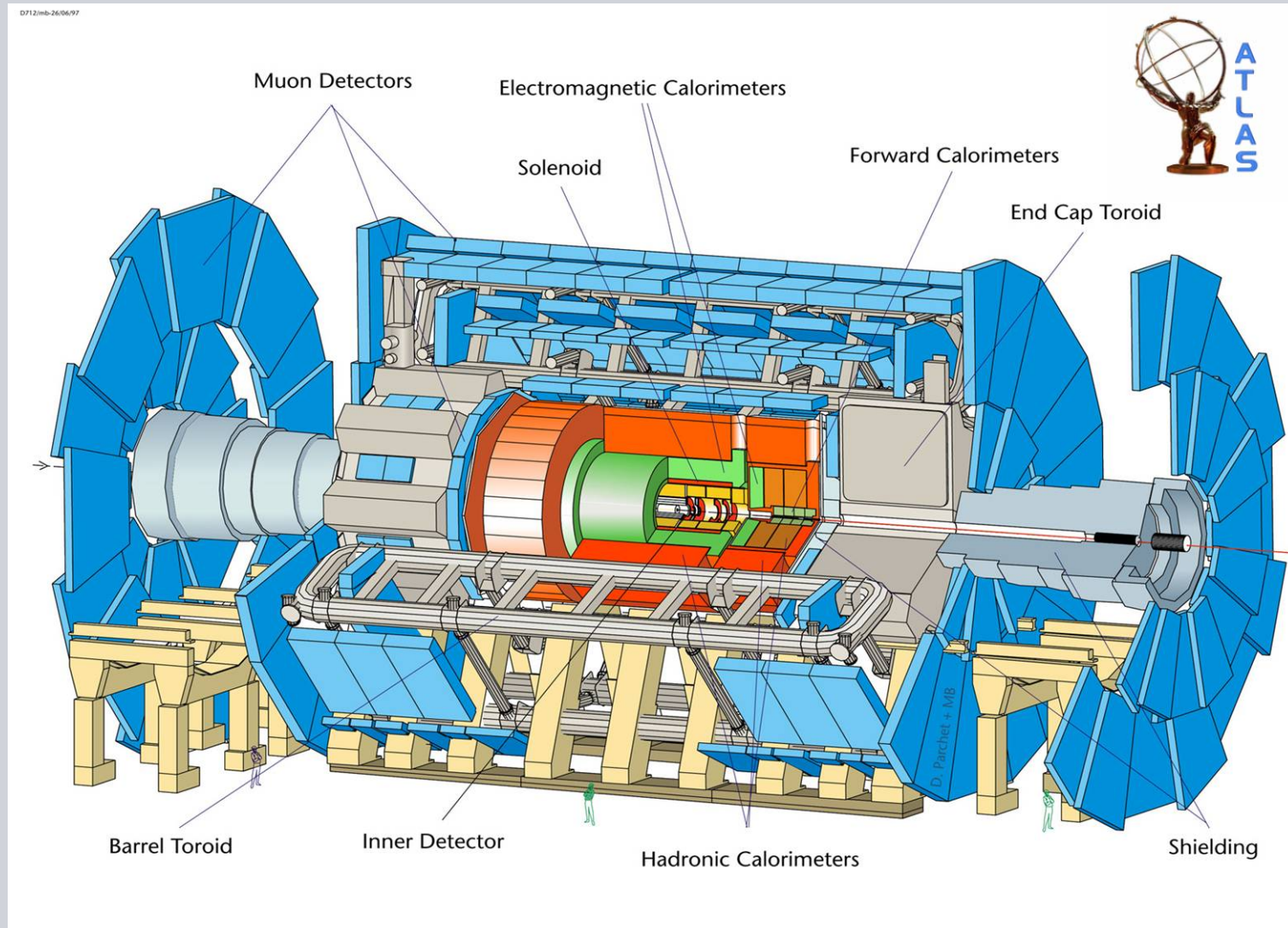
Aufbau der Magnetstrukturen

supraleitende Spulen um die Strahlrohre



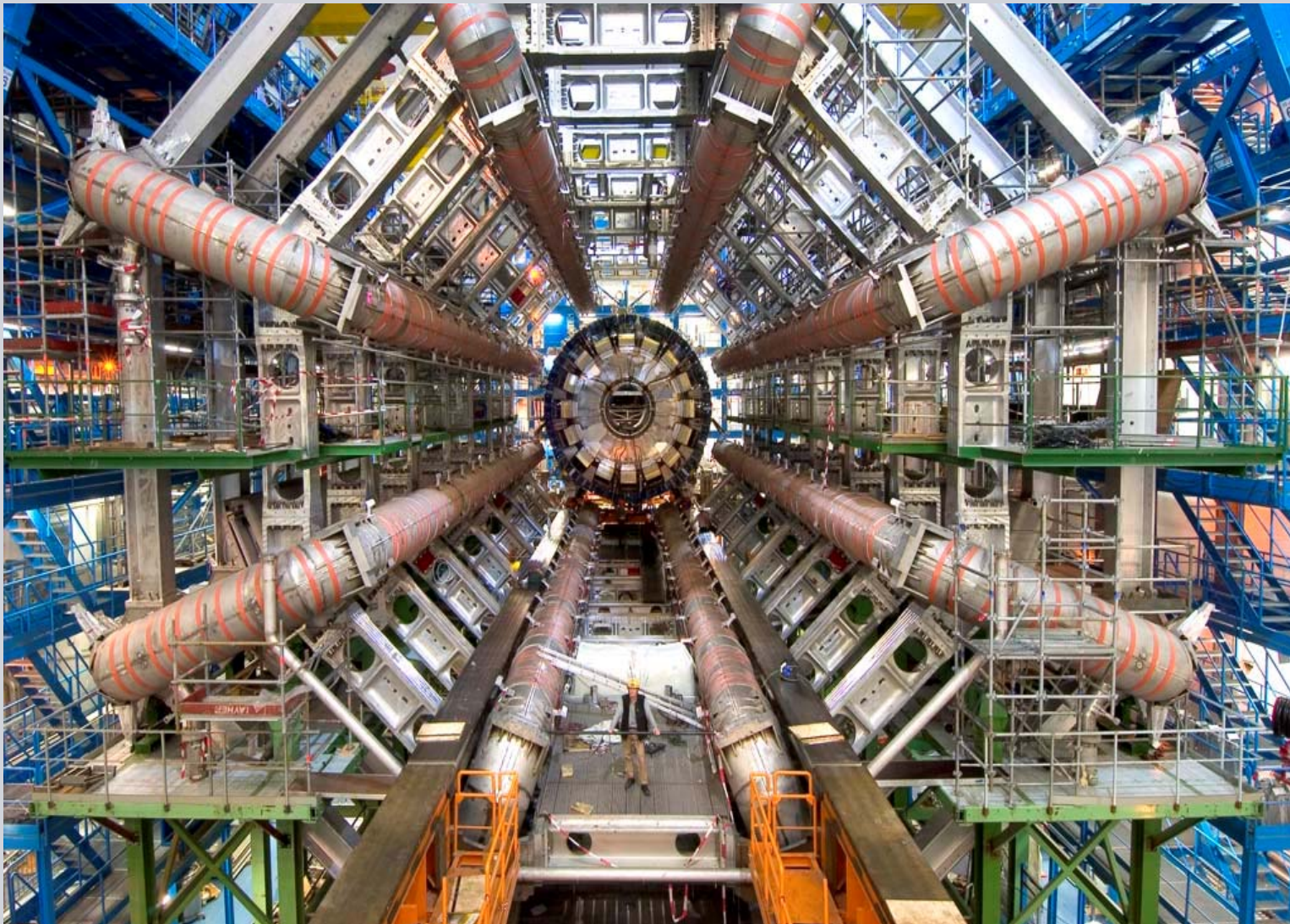
## 2.3 Die Experimente am LHC

### 2.3.1 ATLAS: A Toroidal LHC ApparatuS



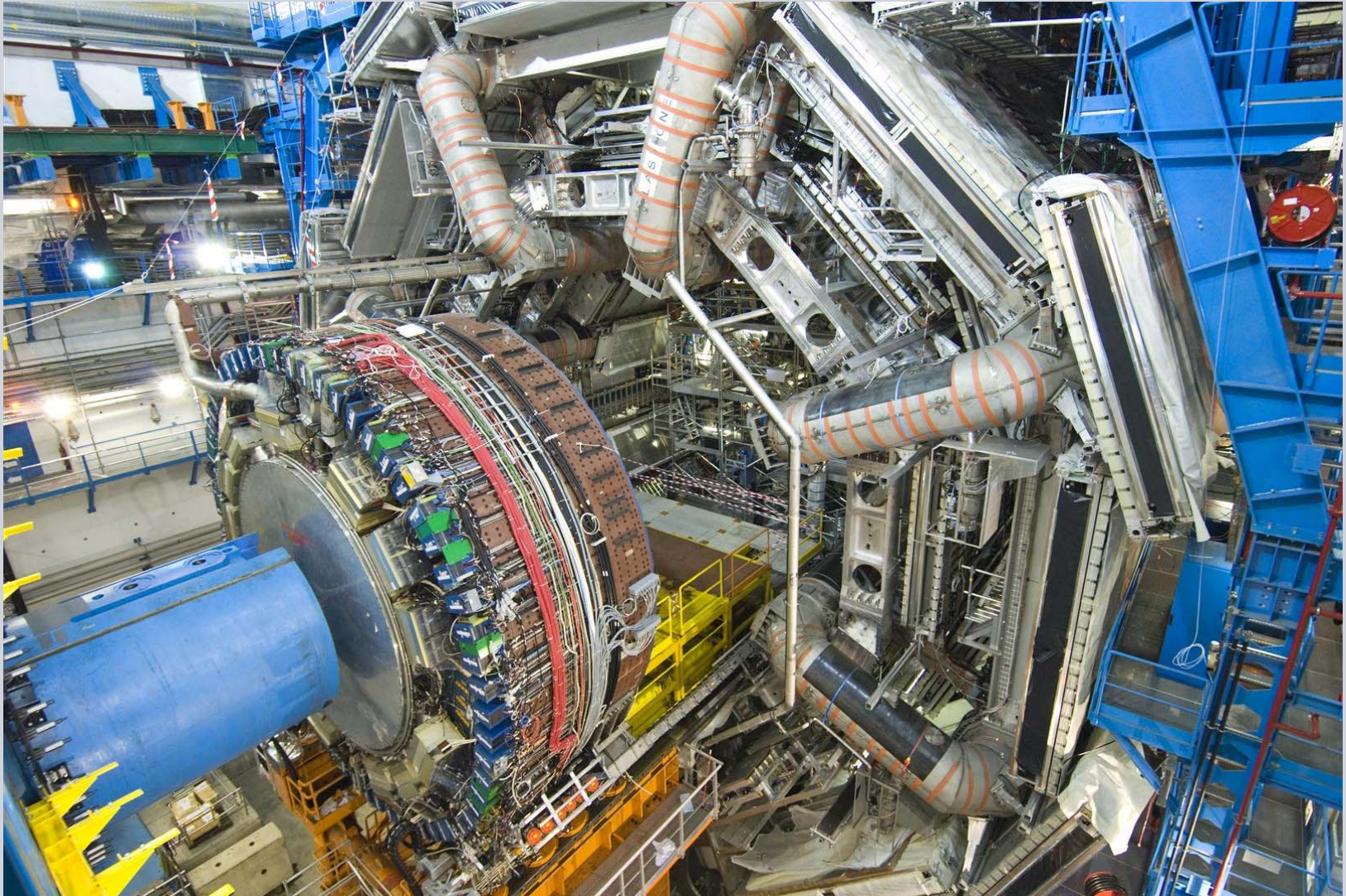


## 2.3.1 ATLAS: A Toroidal LHC Apparatus Toroid-Magnetstruktur



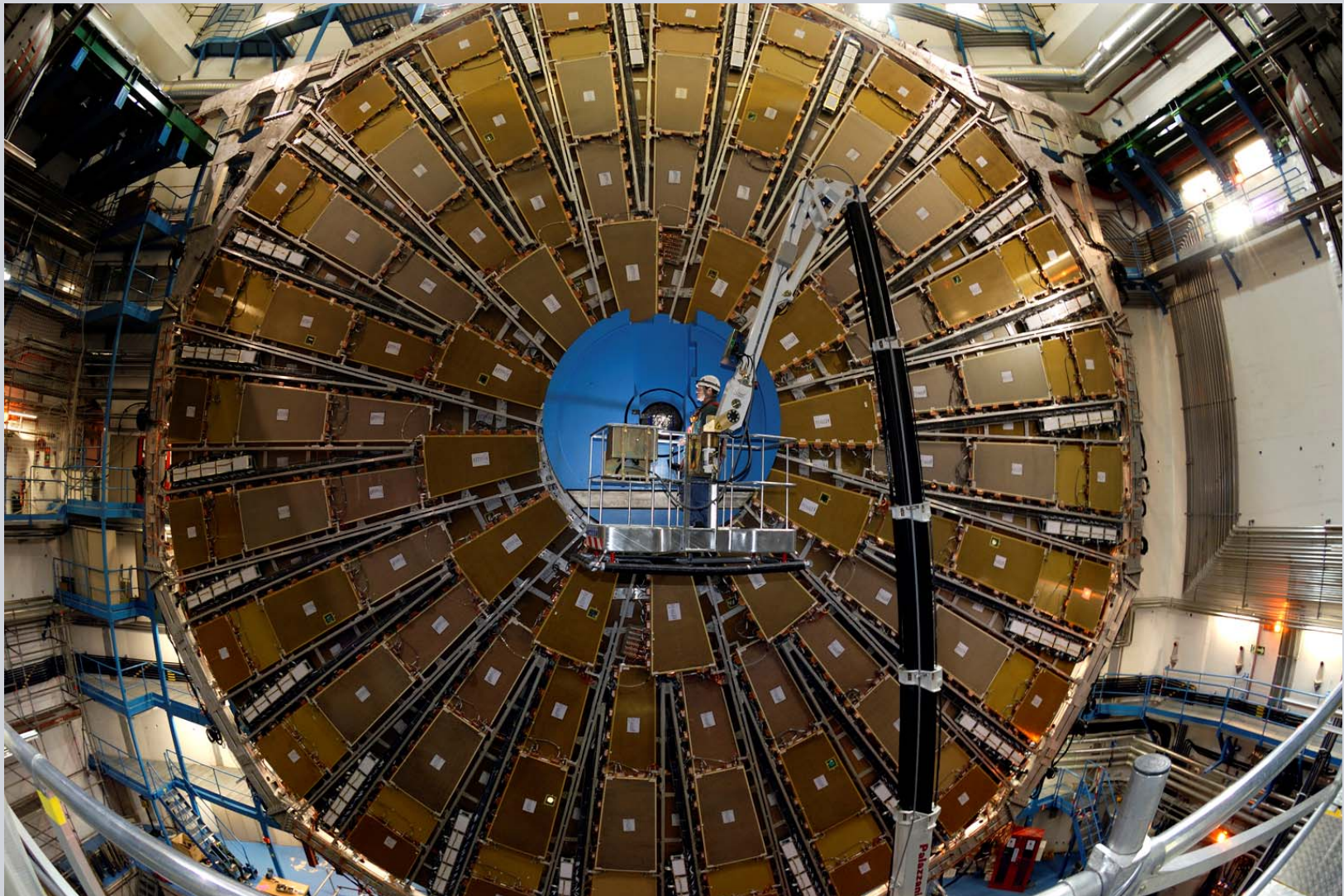


## 2.3.1 ATLAS: A Toroidal LHC ApparatuS Endkappen-Toroid





## 2.3.1 ATLAS: A Toroidal LHC Apparatus Myonendetektoren





## 2.3 Die Experimente am LHC

### 2.3.1 ATLAS: A Toroidal LHC ApparatuS



ATLAS Kenndaten:

Gesamtgewicht [Tonnen]: 7000

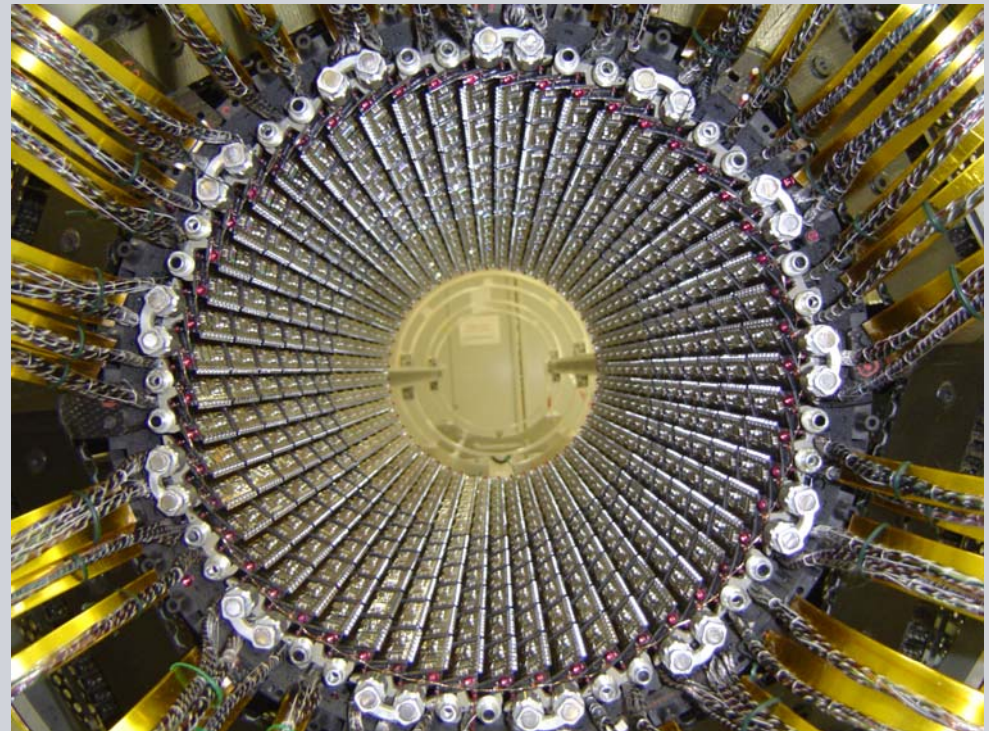
Länge [m]: 46

Durchmesser [m]: 22

Magnetfeld [T]: 2 – 0.6

Gespeicherte Energie [MJ]: 1300

Strom [kA]: 48



ATLAS Silizium-Streifen und -Pixel:  
106 Millionen Kanäle

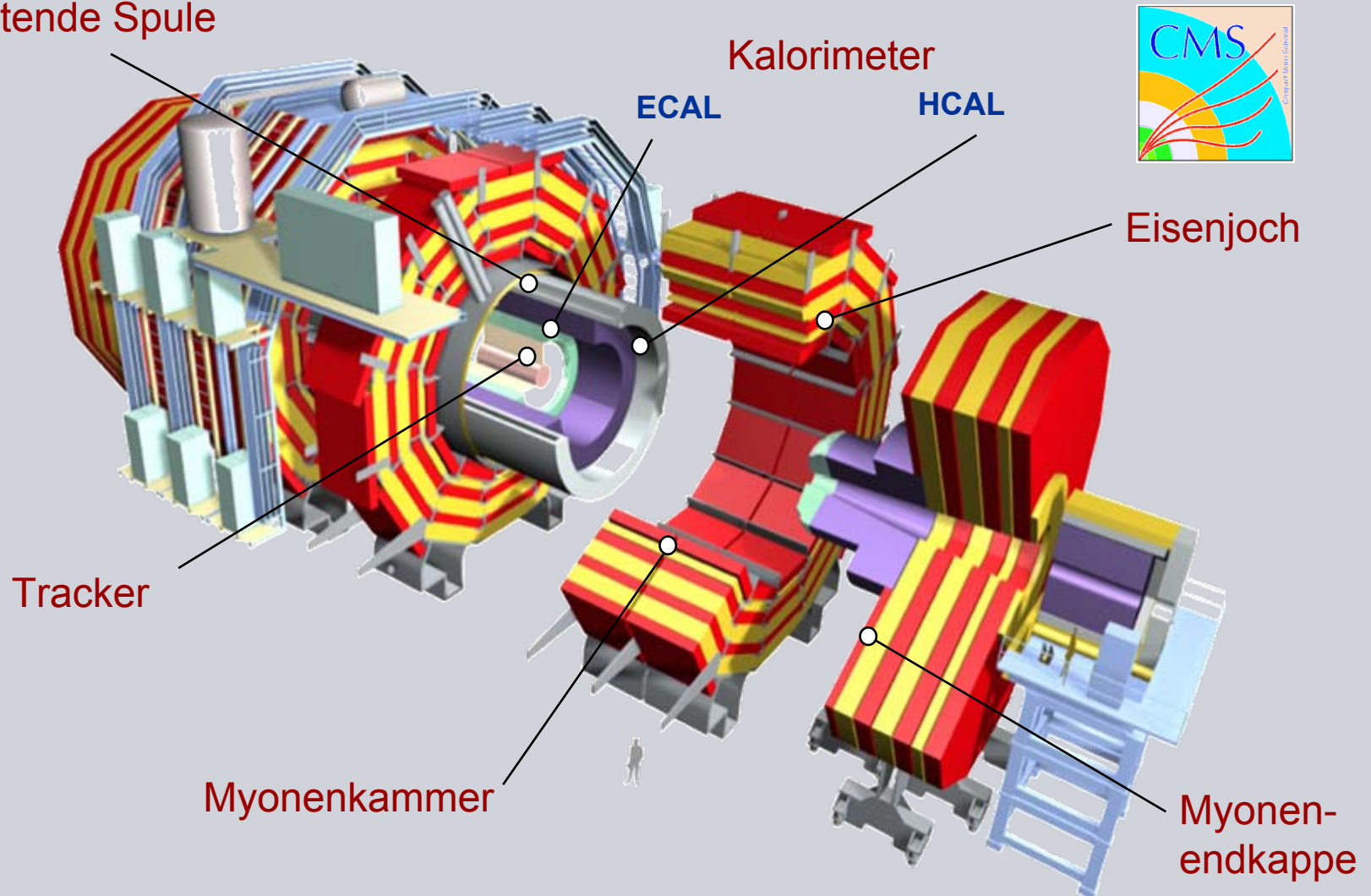


## 2.3 Die Experimente am LHC

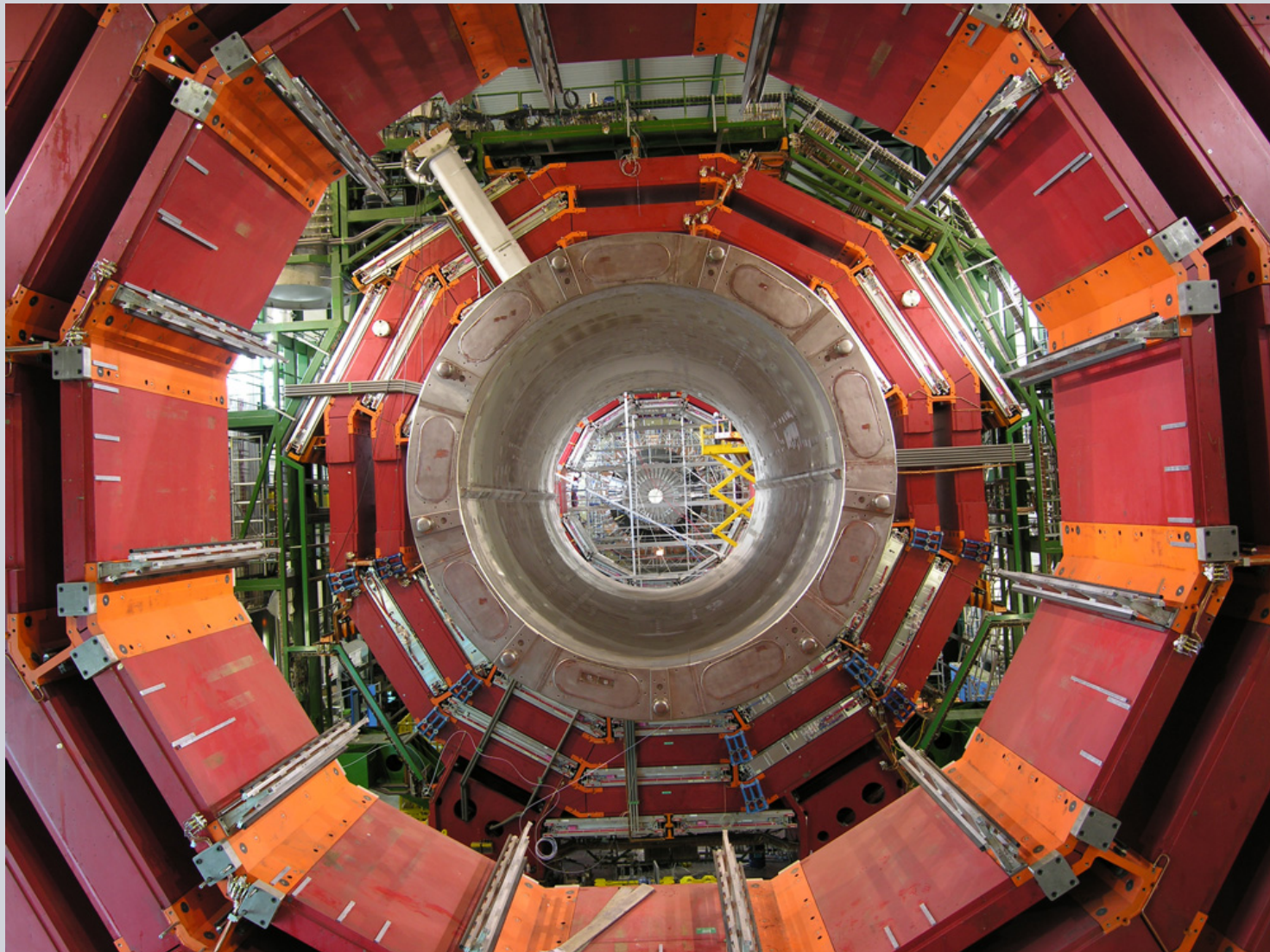
### 2.3.2 CMS: Compact Muon Solenoid



supraleitende Spule

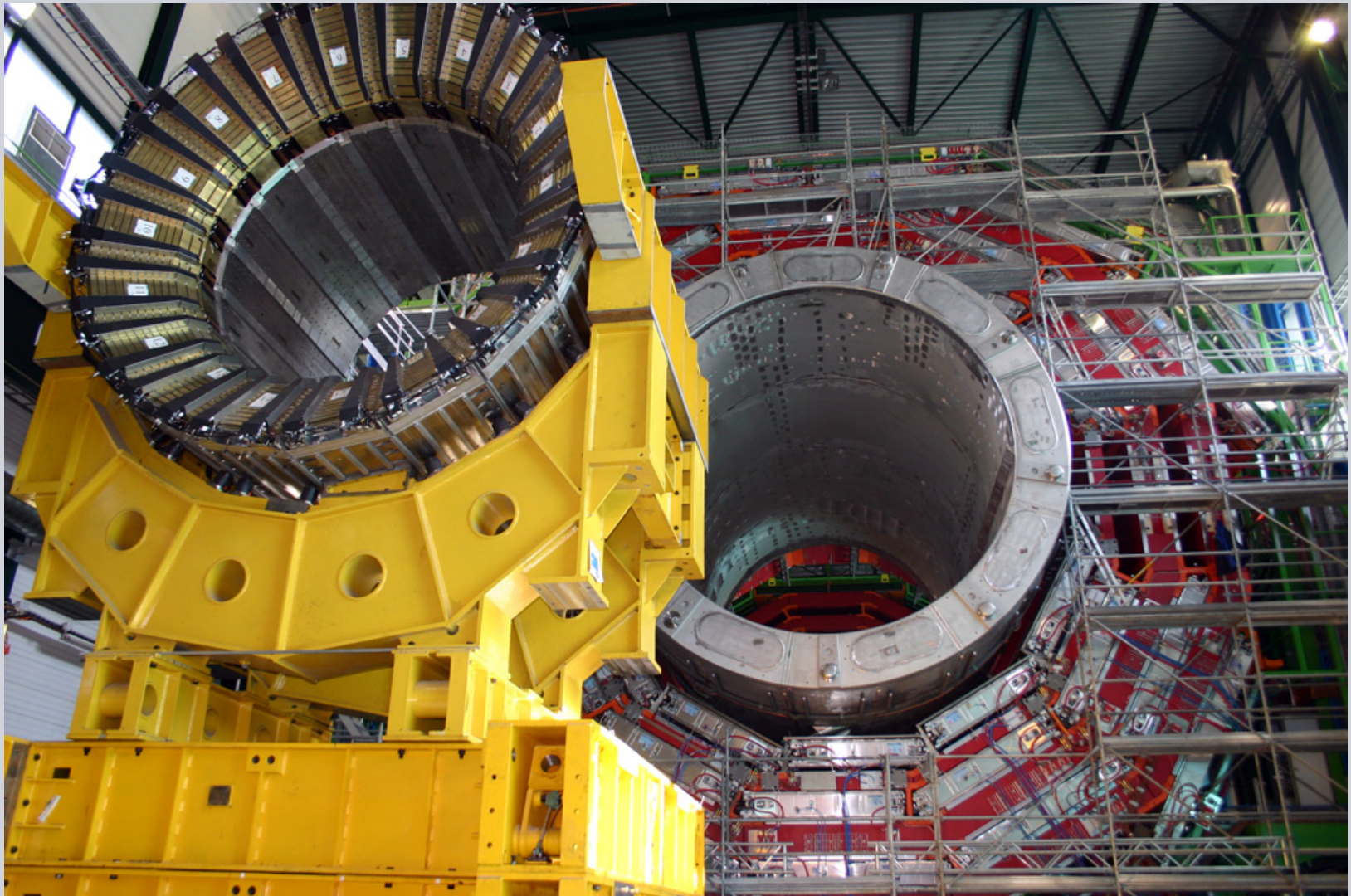


## 2.3.2 CMS: Compact Muon Solenoid Eisenjoch (rot) teils mit Myonendetektoren



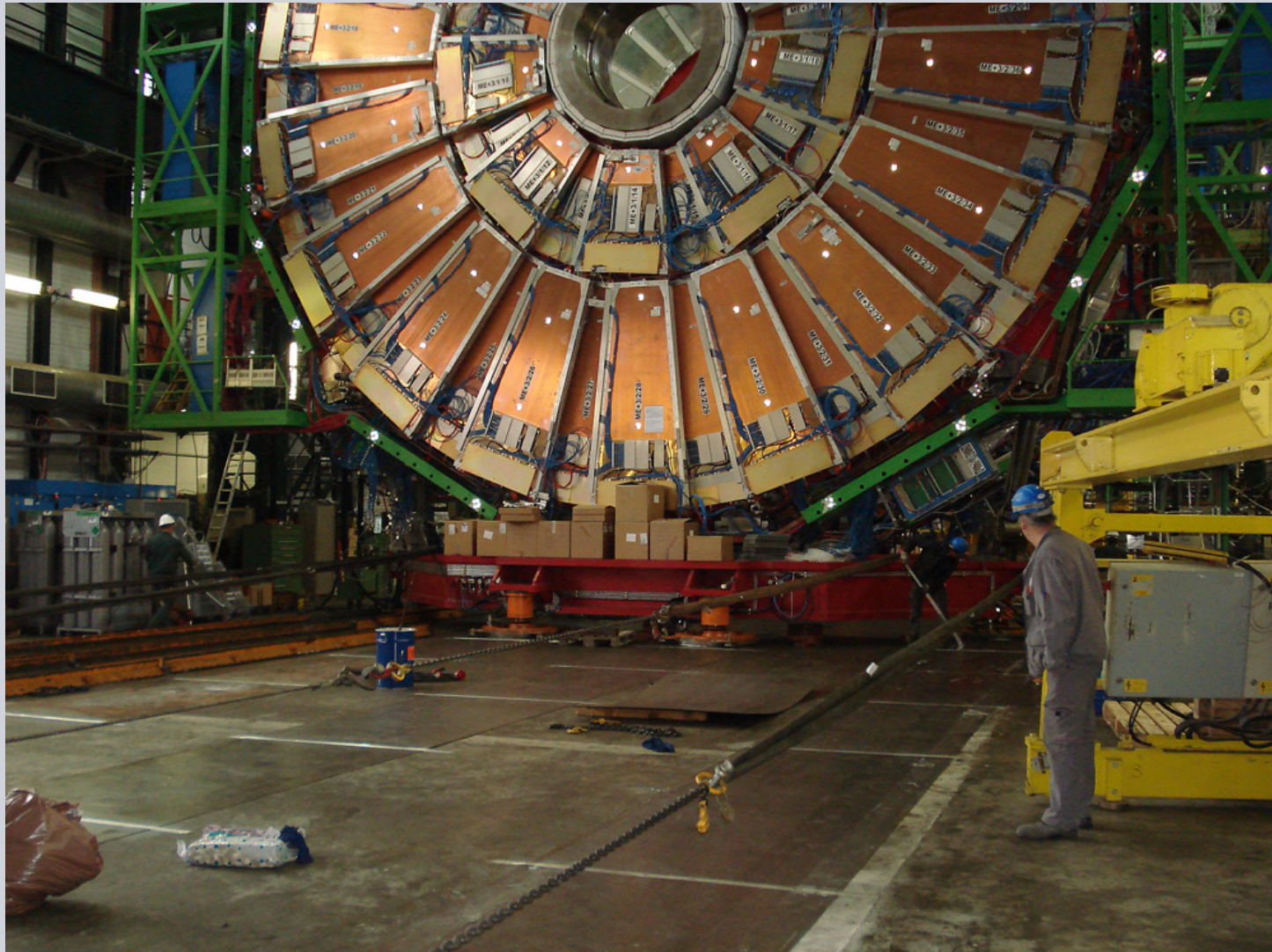


## 2.3.2 CMS: Compact Muon Solenoid Hadronenkalorimeter





## 2.3.2 CMS: Compact Muon Solenoid Myonenendkappe



## 2.3 Die Experimente am LHC

### 2.3.2 CMS: Compact Muon Solenoid



CMS Kenndaten:

Gesamtgewicht [Tonnen]: 12500

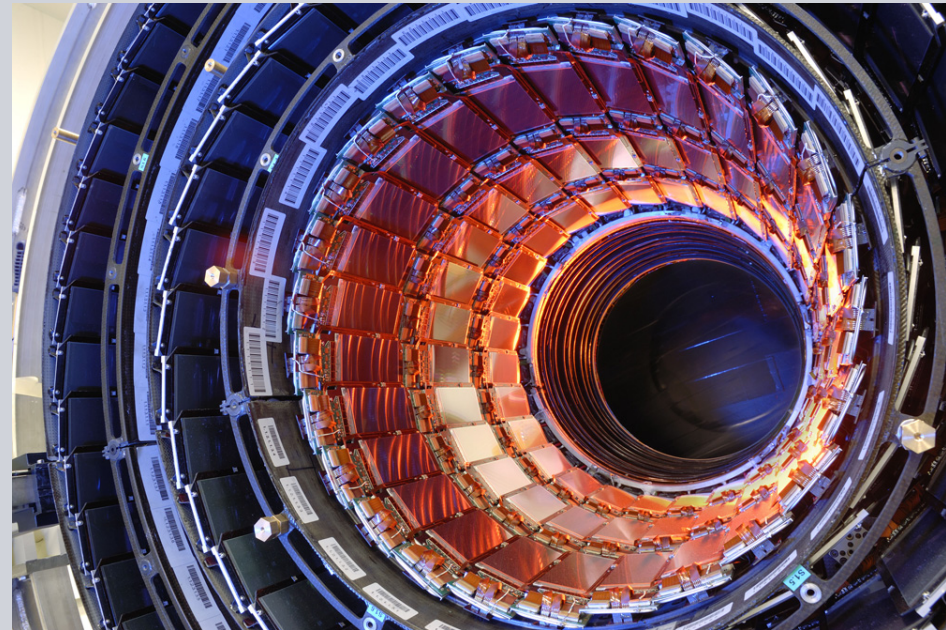
Länge [m]: 22

Durchmesser [m]: 15

Magnetfeld [T]: 4

Gespeicherte Energie [MJ]: 2700

Strom [kA]: 19.5

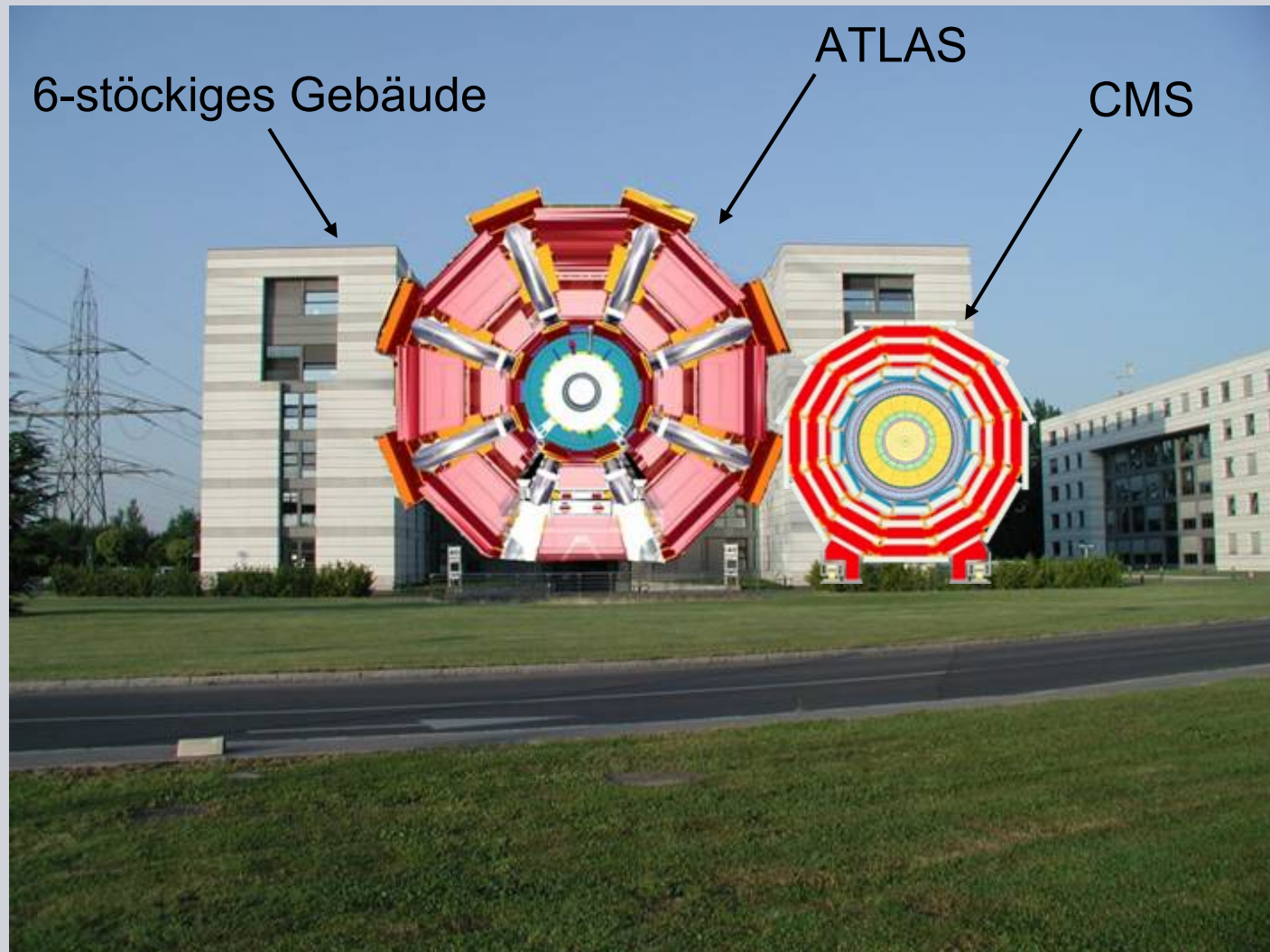


CMS Silizium-Streifen „Tracker“:  
200 m<sup>2</sup> Si, 9.6 Millionen Kanäle



## 2.3 Die Experimente am LHC

### 2.3.3 Größenvergleich ATLAS vs. CMS

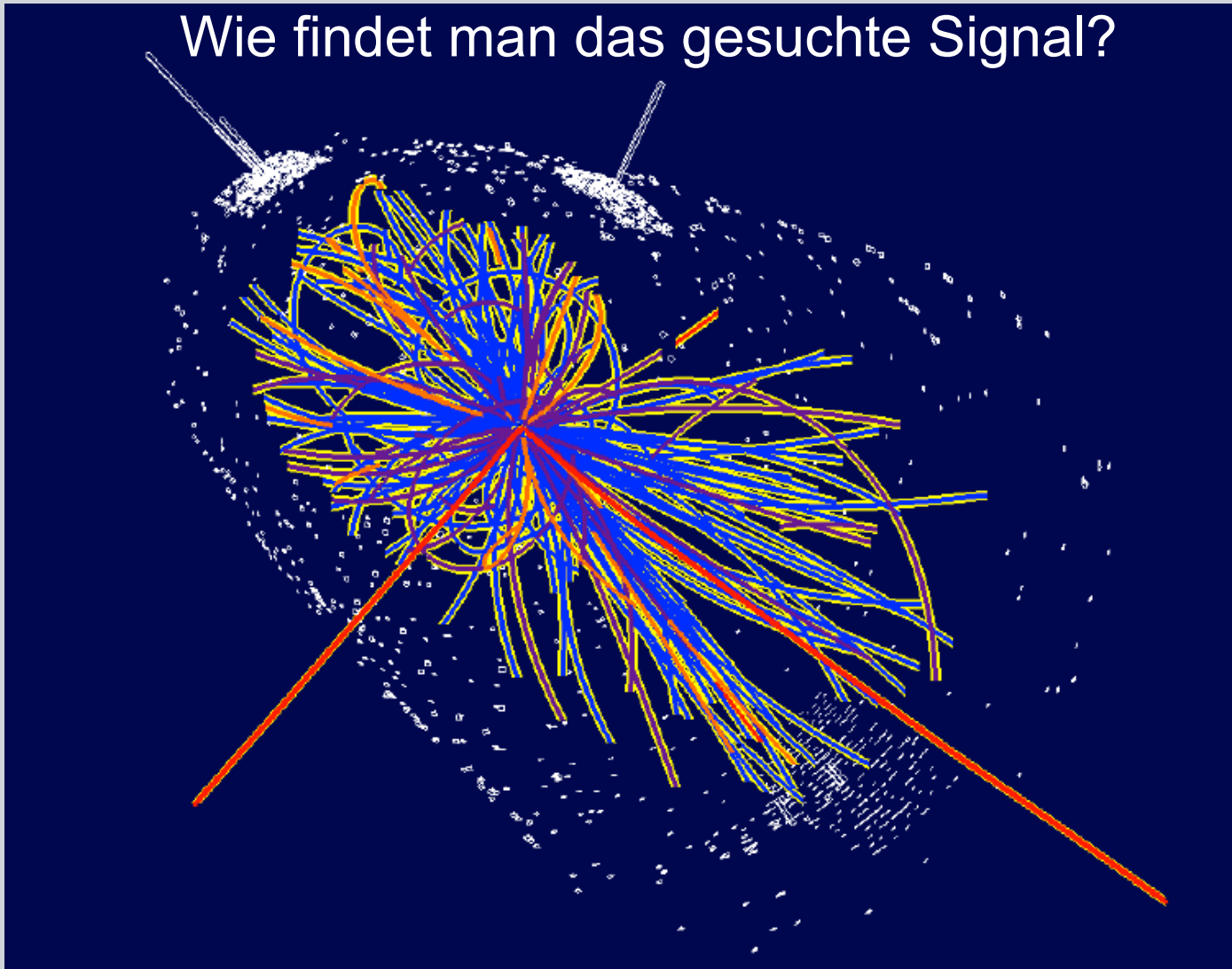




# 3 Nachweis des Higgs-Bosons



Wie findet man das gesuchte Signal?



# 3 Nachweis des Higgs-Bosons

## 3.1 Erwartete Ereignisraten für den LHC



### Reaktionen

▪ Inelastische Proton-Proton  
Streuung

- $bb$ -Paare
- $tt$ -Paare

- $W^\pm \rightarrow e^\pm \nu$
- $Z \rightarrow e^+ e^-$

▪ **Higgs ( $m_H=150$  GeV)**

### Ereignisrate

$10^9$  / s

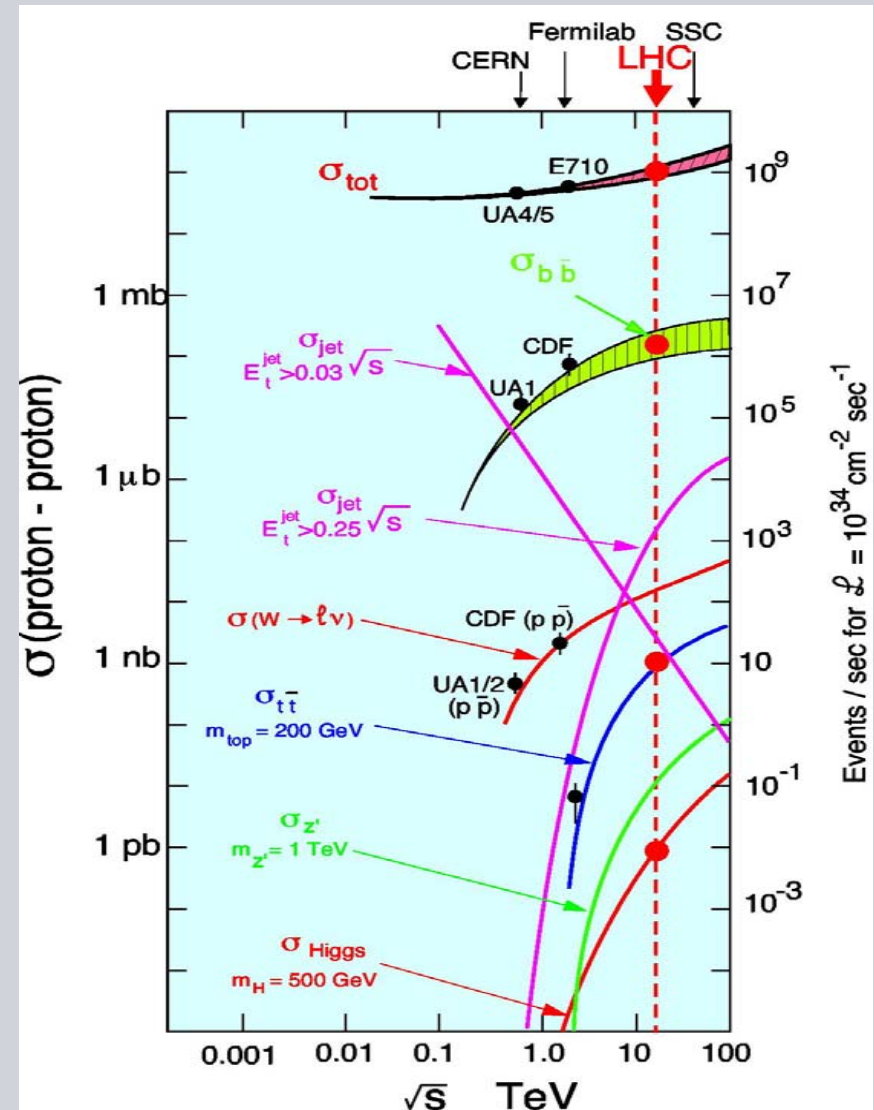
$5 \times 10^6$  / s

8 / s

150 / s

15 / s

**0.2 / s**





# 3 Nachweis des Higgs-Bosons

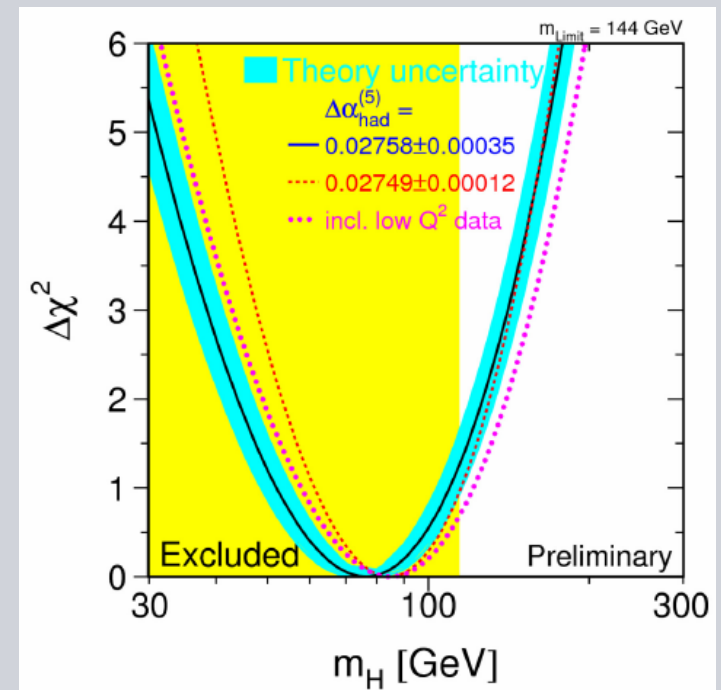
## 3.2 Bisherige experimentelle Suche



### Was wissen wir bis jetzt?

- Higgs-Boson wird benötigt um Teilchenmasse im SM zu erzeugen (vorher Masse per Hand hinzugefügt)
- Keine direkte Voraussage für die Higgs-Masse aus der Theorie, außer einer Obergrenze von 1 TeV
- Untere experimentelle Grenze 114.4 GeV (LEP)
- Ober experimentelle Grenze aus Messungen der elektroschwachen WW (Stand Juli 2007)

$$m_H = 80 (+36) (-26) \text{ GeV}/c^2$$
$$m_H < 144 \text{ GeV}/c^2 \text{ (95 \% CL)}$$



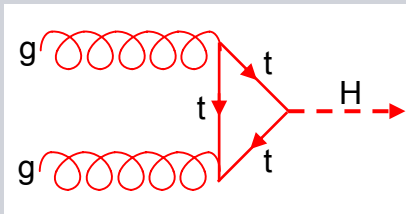
Theo. Auffindwahrscheinlichkeit als Funktion der Masse  
Scheinseminar Astro- und Teilchenphysik WS 07/08

# 3.3 Higgs-Produktion am LHC

## 3.3.1 Kanäle zu Erzeugung des Higgs-Bosons

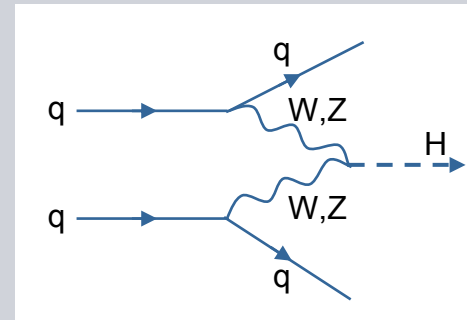


### (i) Gluonfusion



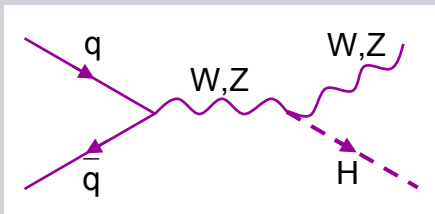
$$gg \rightarrow H$$

### (ii) Vektorbosonfusion (VBF)

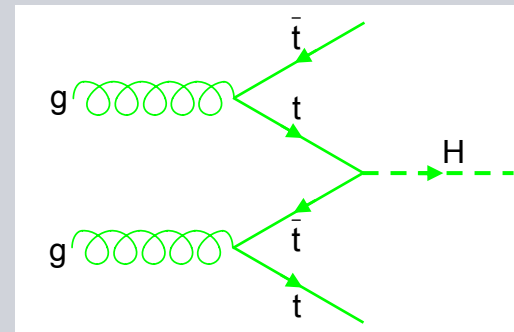


$$qq \rightarrow Hqq$$

### (iii) Begleitende Produktion (W/Z, tt): Bremsstrahlung, tt-Fusion



$$q\bar{q} \rightarrow HZ$$

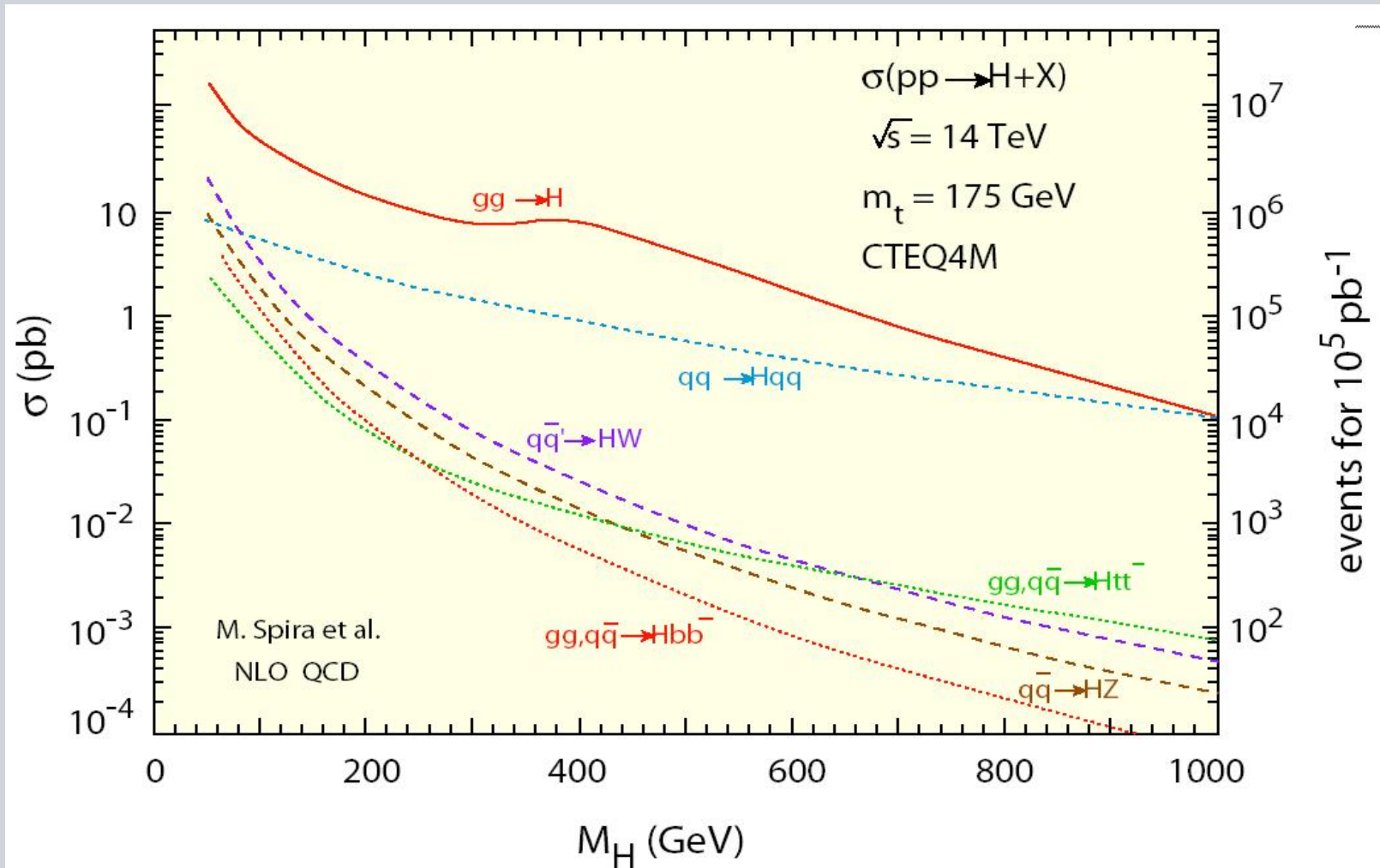


$$gg \rightarrow Ht\bar{t}$$



# 3.3 Higgs-Produktion am LHC

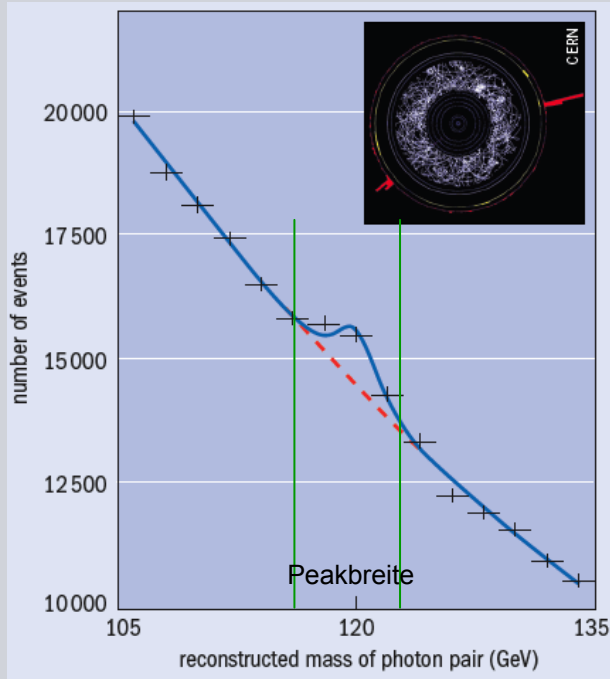
## 3.3.2 Wirkungsquerschnitte der Higgs-Produktion



Wirkungsquerschnitt und Ereignisrate der Higgs-Produktion als Funktion der Higgs-Masse

# 3.3 Higgs-Produktion am LHC

## 3.3.3 Signalsignifikanz



Wann kann man bei einem Ereignis von einer Entdeckung sprechen?

Annahme: neues Teilchen H produziert;  
H zerfällt in 2 Photonen:  $H \rightarrow \gamma\gamma$

Signalsignifikanz:

$$S = \frac{N_S}{\sqrt{N_B}}$$

$N_S$  = Anzahl der Ereignissignale im Peakbereich  
 $N_B$  = Anzahl der Hintergrundsignale im Peakbereich

$\sqrt{N_B} \equiv$  Fehler der Hintergrundsignale für große Werte

$S > 5$ : Das Signal ist 5x größer, als der Fehler des Hintergrunds.  
Wahrscheinlichkeit, dass das Hintergrundsignal mehr als  $5\sigma$  variiert:  $10^{-7} \Rightarrow$  Entdeckung (Konvention)



# 3 Nachweis des Higgs-Bosons am LHC

## 3.4 Zerfall des Higgs-Bosons



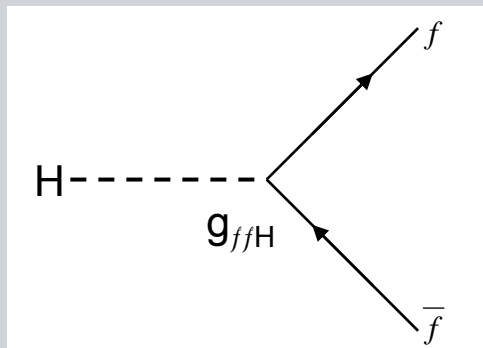
Kopplungskonstanten:

$$g_{ffH} = (\sqrt{2}G_F)^{1/2} m_f = \frac{m_f}{v}$$

$$g_{VVH} = 2(\sqrt{2}G_F)^{1/2} M_V^2 = \frac{2M_V^2}{v}$$

$f$  = Fermion, Quark

$V$  = Vektorboson  $W^\pm, Z$



Zerfallsbreiten  $\Gamma$  für das Higgs-Boson:

$$\Gamma(H \rightarrow f \bar{f}) = \frac{G_F m_f^2 M_H}{4\pi\sqrt{2}} N_C (1 - \rho_f)^{3/2}$$

$$\Gamma(H \rightarrow WW) = \frac{G_F M_H^3}{8\pi\sqrt{2}} \left(1 - \rho_W + \frac{3}{4} \rho_W^2\right) \sqrt{1 - \rho_W}$$

$$\Gamma(H \rightarrow ZZ) = \frac{G_F M_H^3}{16\pi\sqrt{2}} \left(1 - \rho_Z + \frac{3}{4} \rho_Z^2\right) \sqrt{1 - \rho_Z}$$

$$\Gamma(H \rightarrow \gamma\gamma) = \frac{G_F \alpha^2 M_H^3}{128\pi^3 \sqrt{2}} \left(\frac{4}{3} N_C e_t^2 - 7\right)^2$$

mit :  $N_C = \text{Farbfaktor}$  ;  $\rho_i = \frac{4m_i^2}{M_H^2}$   $i = q, l, W, Z$

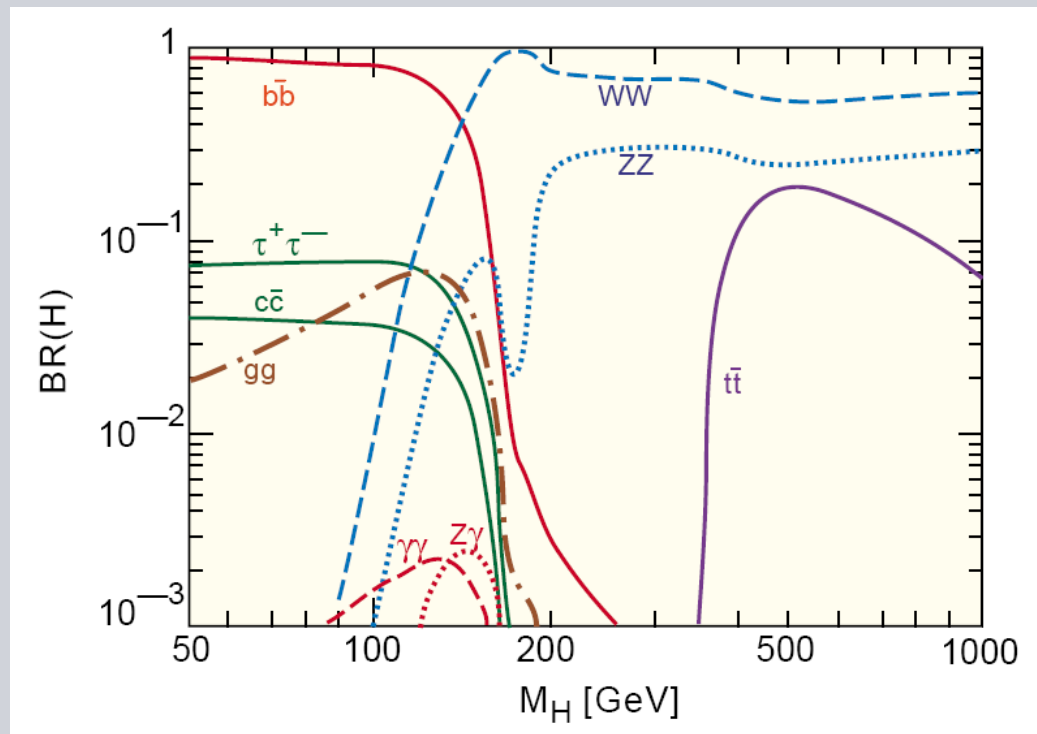
$$G_F = 1,16639 \cdot 10^{-5} \text{ GeV}^{-2} ; e_t = \frac{2}{3} e$$

# 3 Nachweis des Higgs-Bosons am LHC

## 3.4 Zerfall des Higgs-Bosons



- Kopplungsstärken beim Zerfall des Higgs-Teilchens sind proportional zur Masse der entstandenen Teilchen!



Verzweigungsverhältnisse (BR: branching ratios) für den Zerfall des Higgs-Bosons als Funktion der Higgs-Masse.

⇒ Bevorzugt zerfällt das Higgs-Teilchen in die schwersten, kinematisch erlaubten Teilchen



# 3 Nachweis des Higgs-Bosons am LHC

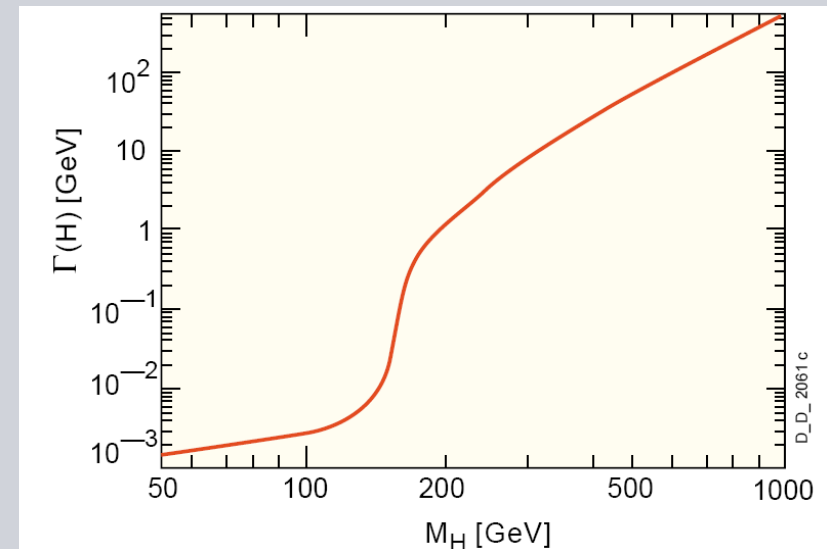
## 3.4 Zerfall des Higgs-Bosons



Die 3 wichtigsten Zerfallskanäle des Higgs-Teilchens:

$$\begin{aligned} H &\rightarrow \gamma\gamma \\ H &\rightarrow ZZ \rightarrow 4\ell \\ H &\rightarrow WW \rightarrow 2\ell 2\nu \end{aligned}$$

- Niedrige Masse ( $m_H < 2m_Z$ ):
  - bb-Kanal dominant, jedoch zu hoher QCD-Hintergrund
  - Besser geeignet:  $\gamma\gamma$ - und WW-Kanal
- Hohe Masse ( $m_H > 2M_Z$ )
  - ZZ-Kanal
  - Zusätzlich WW-Kanal



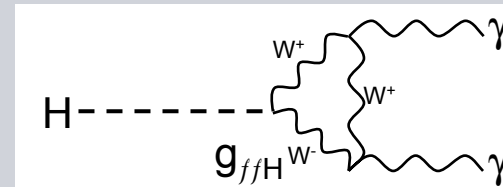
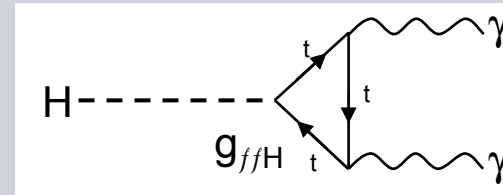
Gesamte Zerfallsbreite des Higgs-Bosons

# 3.5 Zerfallskanäle

## 3.5.1 $H \rightarrow \gamma\gamma$

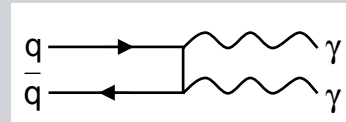


- Signal:
  - $\sigma \times \text{B.R.} \approx 99 \text{ fb}$  (42 fb)  
für  $m_H \approx 115 \text{ GeV}/c^2$  ( $m_H = 150 \text{ GeV}/c^2$ )



- Hintergrund:
  - $\gamma\gamma$ : nicht reduzierbar

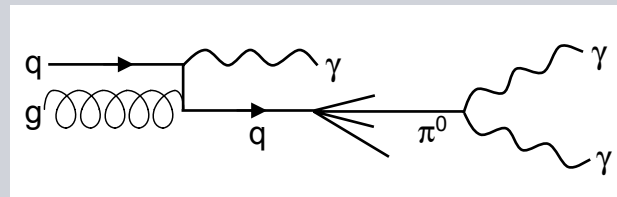
$$\sigma_{\gamma\gamma} \approx 80 \text{ pb} / \text{GeV}$$



- $\gamma j + jj$ : reduzierbar

$$\sigma_{\gamma j + jj} \approx 10^6 \sigma_{\gamma\gamma}$$

$$j \text{ (jet)} \rightarrow \pi^0 + X ; \pi^0 \rightarrow \gamma\gamma$$

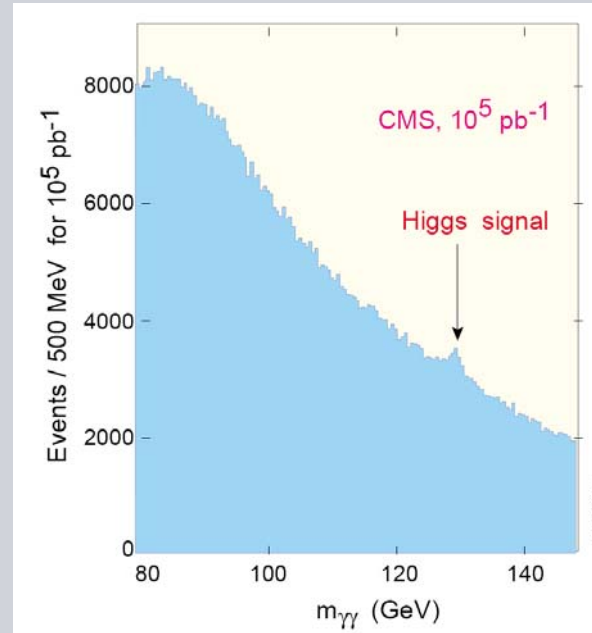
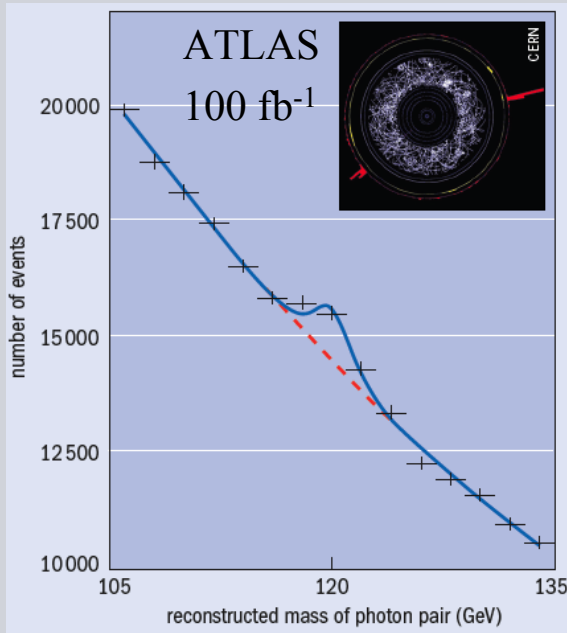


Man benötigt hohe Photonennachweiseffizienz und präzise Trennung von  $\gamma$  / jet und  $\gamma$  /  $\pi^0$  -Events  $\Rightarrow$  Höchste Anforderungen an die e.m. Kalorimeter!



## 3.5 Zerfallskanäle

### 3.5.1 $H \rightarrow \gamma\gamma$



Zwei isolierte Photonen

$$E_{\text{kin}}(\gamma_1) > 40 \text{ GeV}$$

$$E_{\text{kin}}(\gamma_2) > 25 \text{ GeV}$$

Energieauflösung  
( $m_H = 100 \text{ GeV}/c^2$ ):

ATLAS: 1.1 GeV (LAr-Pb)  
CMS: 0.6 GeV (Kristalle)

Simulation für den  $H \rightarrow \gamma\gamma$  in ATLAS und CMS

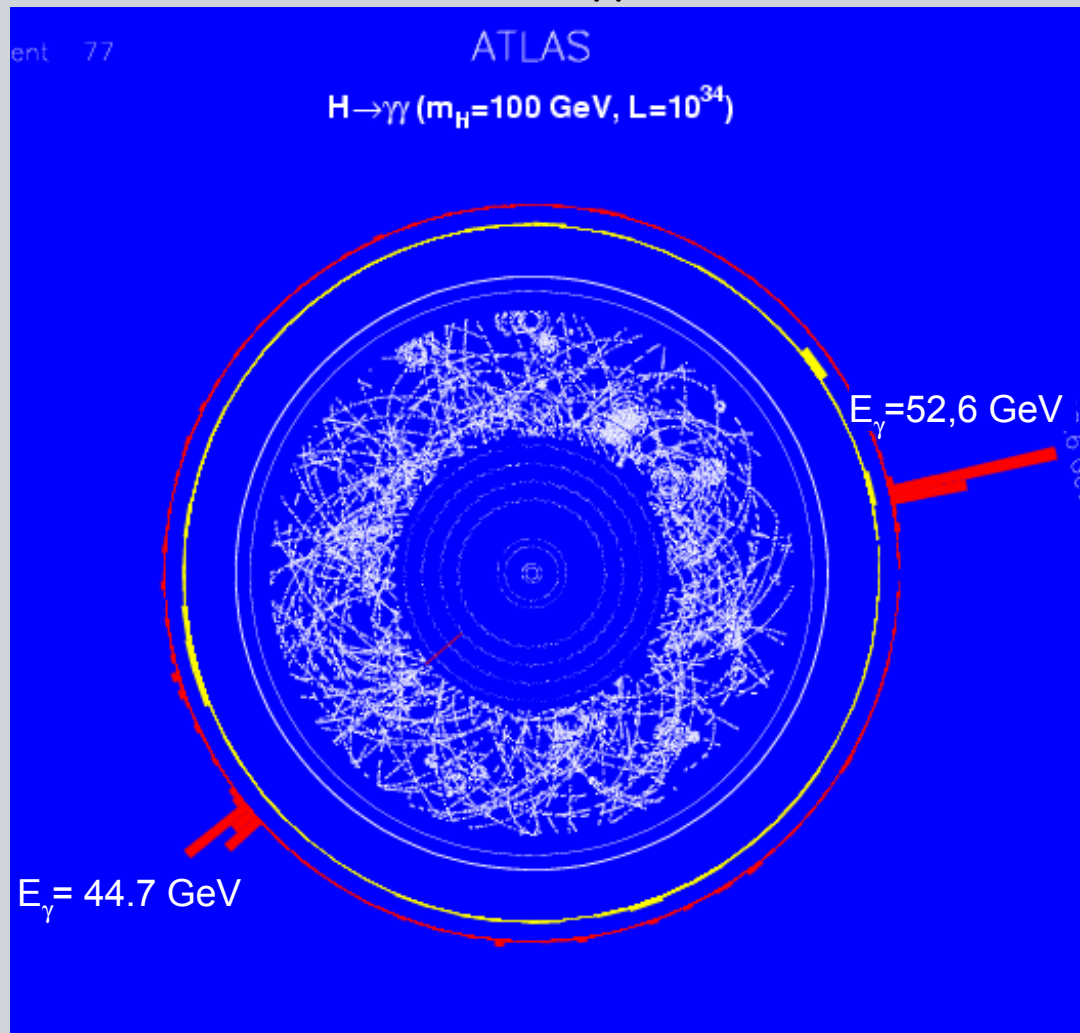
- Verhältnis Signal / Hintergrund  $\sim 4\%$
  - Hintergrund kann mit Hilfe von Seitenbänder unterdrückt werden
  - Unterschiedliche Stärken der Detektoren
    - ATLAS: Photonenidentifikation, Winkelauflösung
    - CMS: Energieauflösung
- $\Rightarrow$  Entdeckungspotential für  $100 \text{ GeV}/c^2 < m_H < 150 \text{ GeV}/c^2$

## 3.5 Zerfallskanäle

### 3.5.1 $H \rightarrow \gamma\gamma$



Simulation eines  $H \rightarrow \gamma\gamma$  Events in ATLAS



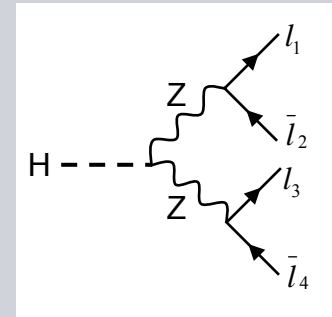
# 3.5 Zerfallskanäle

## 3.5.2 $H \rightarrow ZZ \rightarrow llll$



- Signal:

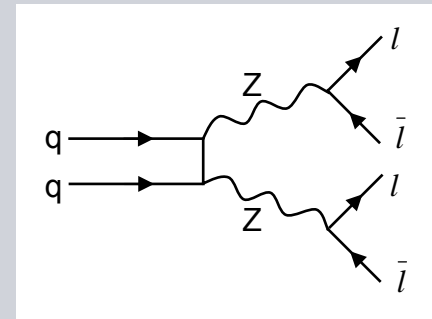
- $\sigma \times \text{B.R.} = 13 \text{ fb} \text{ (24 fb)}$   
für  $m_H = 150 \text{ GeV}/c^2$  ( $m_H = 200 \text{ GeV}/c^2$ )



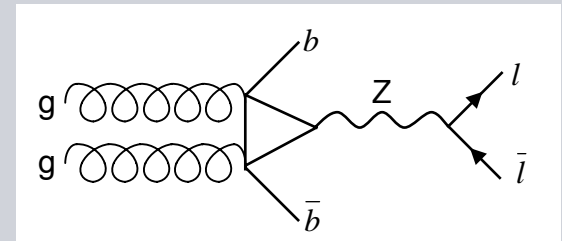
$E_{\text{Kin}}(1,2) > 20 \text{ GeV}$   
 $E_{\text{Kin}}(3,4) > 7 \text{ GeV}$   
 $|\eta| < 2.5$   
 isolierte Leptonen

- Hintergrund:  $\sigma \times \text{B.R.} \approx 1.14 \text{ pb}$

- Nicht reduzierbar  
 $qq \rightarrow ZZ \rightarrow llll$   
 Masse der ZZ kann rekonstruiert werden!



- Reduzierbar  
 $gg \rightarrow Z bb \rightarrow ll bb \rightarrow ll clv clv$   
 $tt \rightarrow Wb Wb \rightarrow lv clv lv clv$   
 Nicht isolierte Leptonen!





## 3.5 Zerfallskanäle

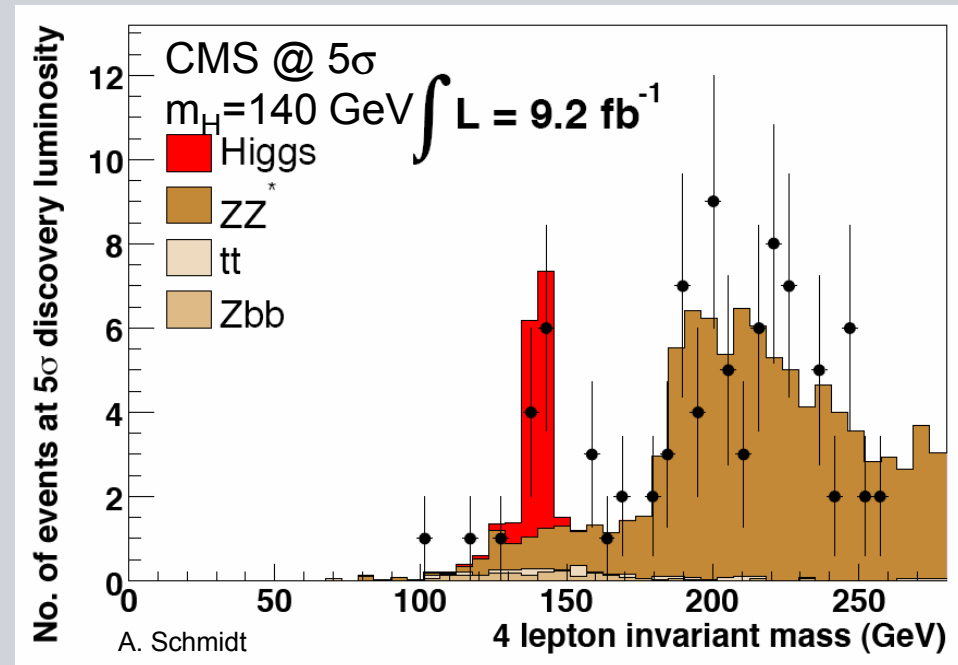
### 3.5.2 $H \rightarrow llll$



- Wichtig ist eine präzise Identifikation und Energieauflösung für Elektronen und Myonen (für  $m_H = 130 \text{ GeV}/c^2$   $\Delta E = 1.5 - 2 \text{ GeV}$ )

- Mögliche Endzustände:
  - $4e: e^+e^- e^+e^-$
  - $2e 2\mu: e^+e^- \mu^+\mu^-$
  - $4\mu$  (Golden Mode):  $\mu^+\mu^- \mu^+\mu^-$

- Dominanter Hintergrund nach Unterdrückung: ZZ-Kontinuum

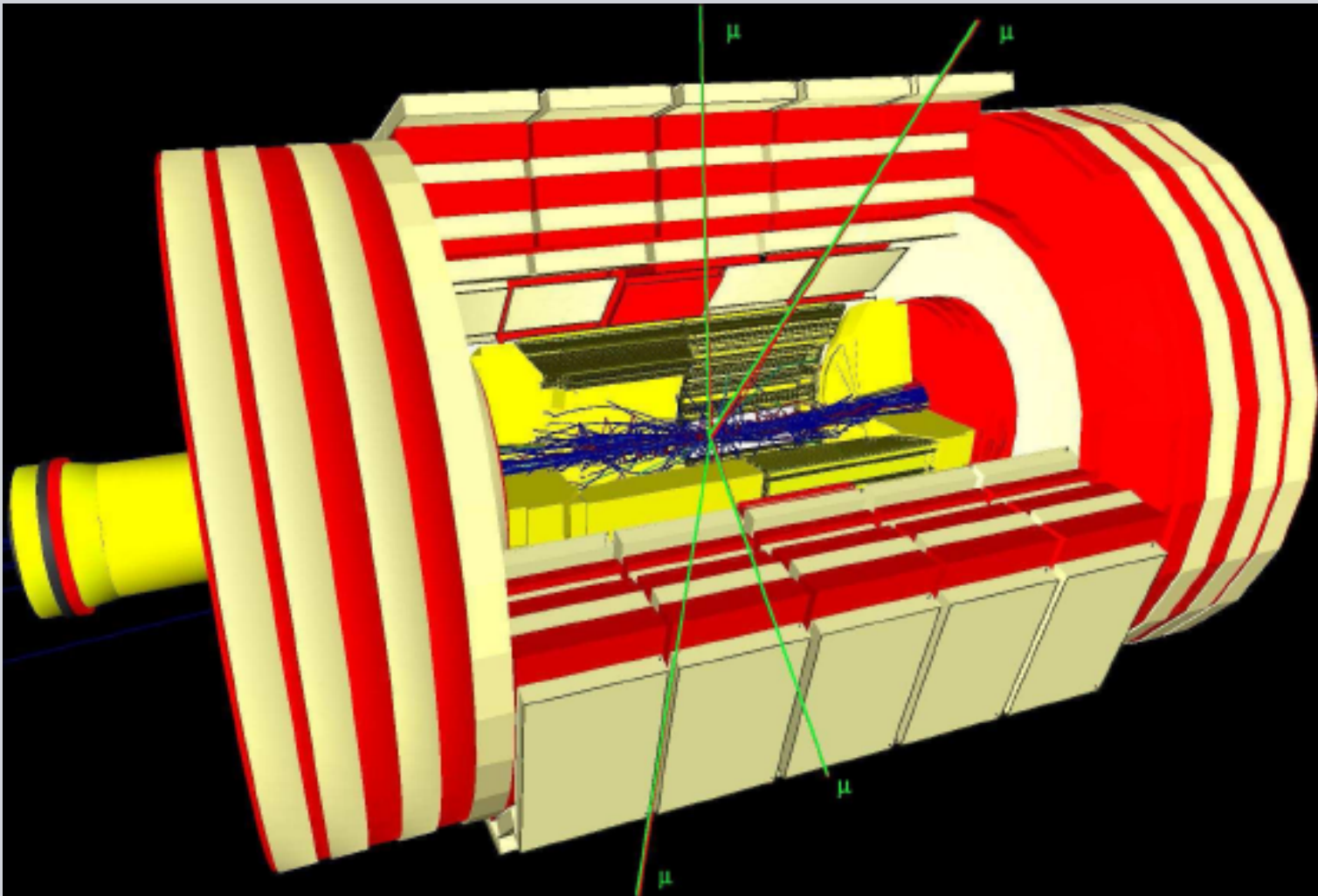


Signifikanzdiagramm für den Zerfallskanal  $H \rightarrow ee\mu\mu$

⇒ Entdeckungspotential für  $130 \text{ GeV}/c^2 < m_H < 600 \text{ GeV}/c^2$

## 3.5 Zerfallskanäle

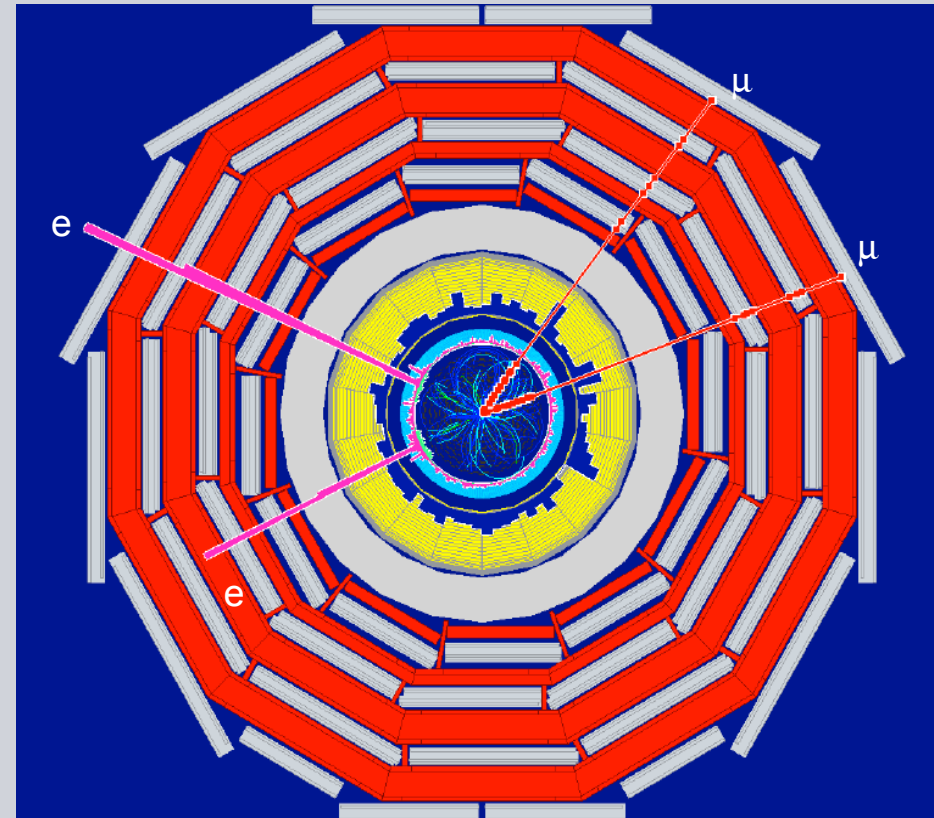
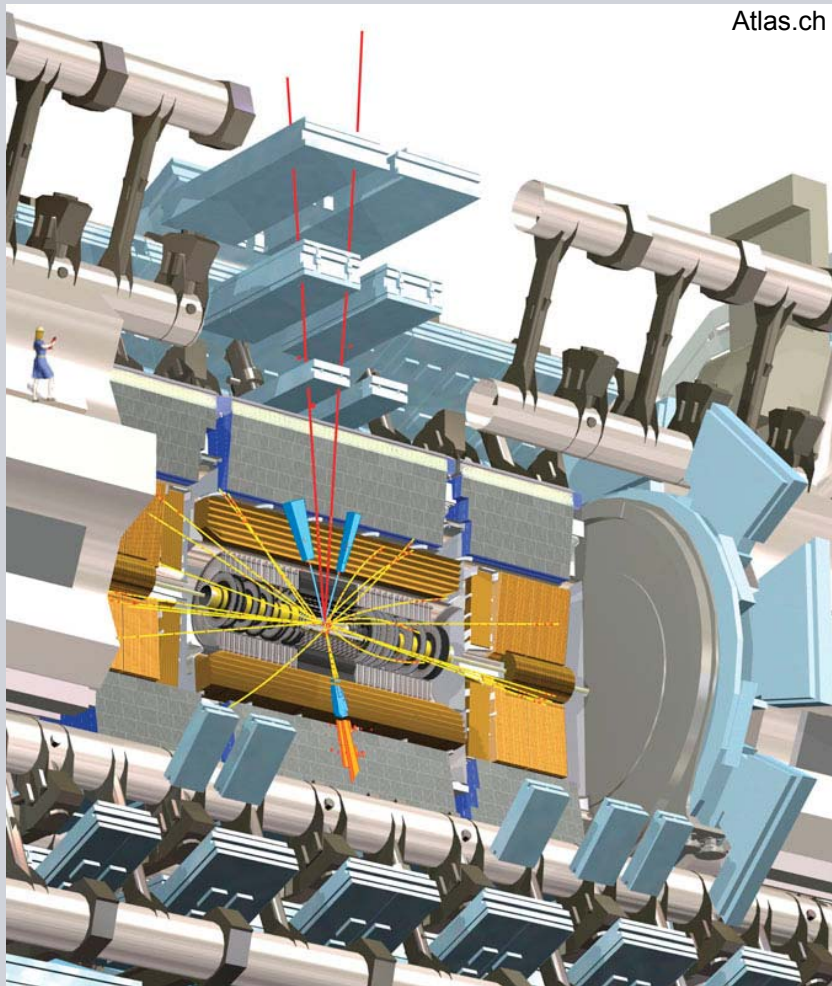
### 3.5.2 $H \rightarrow llll$



Higgs in  $4\mu$ : 'The Golden mode' Simulation in CMS

## 3.5 Zerfallskanäle

### 3.5.2 $H \rightarrow llll$



... und CMS

Simulation einer Higgs-Events in ATLAS:  
 $H \rightarrow ZZ \rightarrow e^+e^- \mu^+\mu^-$



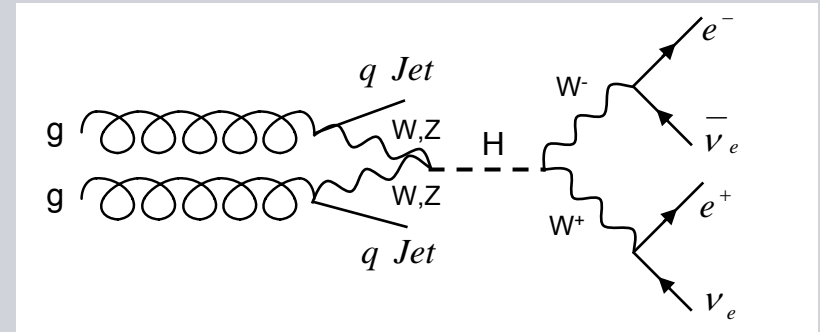
## 3.5 Zerfallskanäle

### 3.5.3 $H \rightarrow WW \rightarrow 2\ell 2\nu$



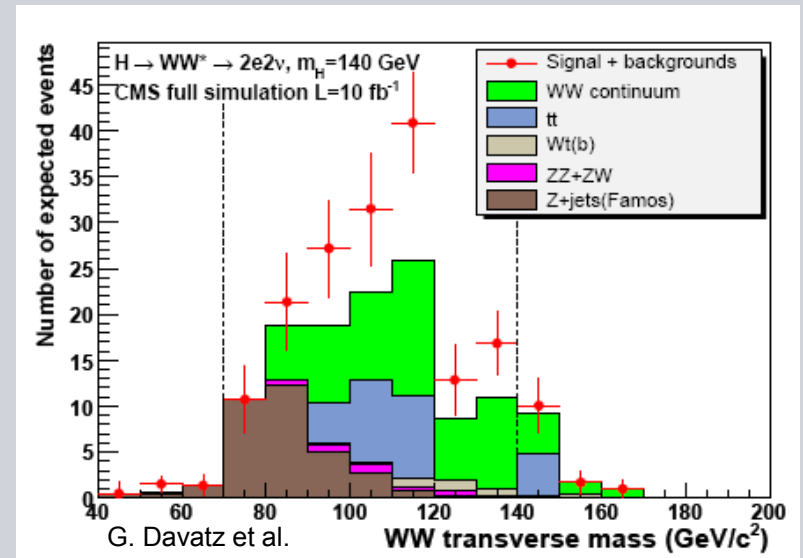
#### ▪ Signal

- $\sigma \times \text{B.R.} = 2.5 \text{ pb}$  ( $m_H = 160 \text{ GeV}/c^2$ )
- 2 vorwärts gerichtete hadronische Jets
- geringe Jet-Aktivität in der Zentralregion = Higgs-Zerfallsprodukte
- kein Massen-Peak aufgrund der 2  $\nu$



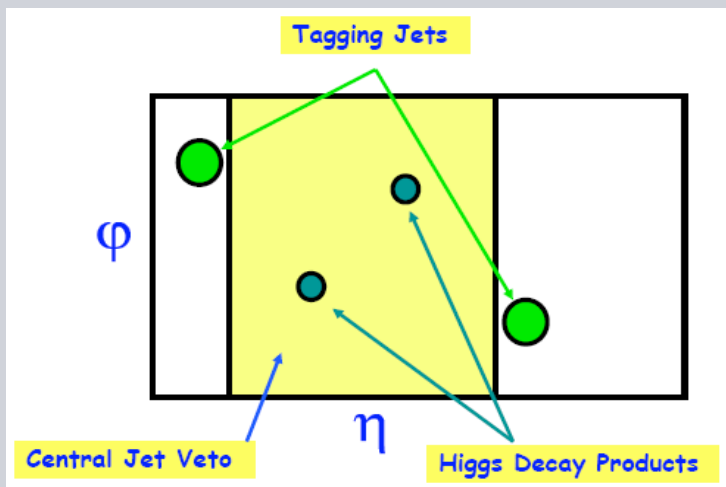
#### ▪ Hintergrund

- $\sigma \times \text{B.R.} \approx 105 \text{ pb}$
- $qq \rightarrow tt \rightarrow Wb Wb \rightarrow 2\ell 2\nu bb$  (Jet-Veto)
- $qq \rightarrow tWb \rightarrow Wb Wb \rightarrow 2\ell 2\nu bb$  (Jet-Veto)
- $qq \rightarrow WW \rightarrow 2\ell 2\nu$  (Spinkorrelation)
- $gg \rightarrow WW \rightarrow 2\ell 2\nu$  (Spinkorrelation)



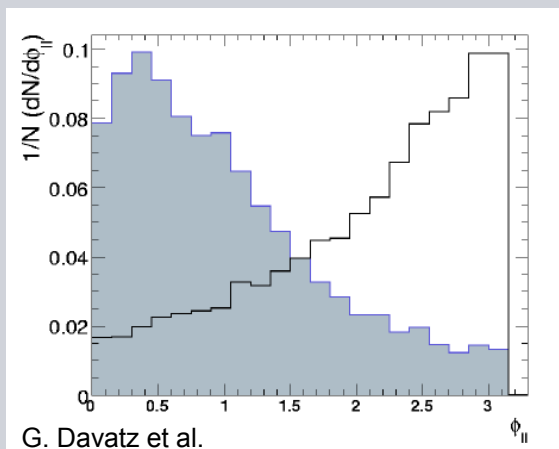
# 3.5 Zerfallskanäle

## 3.5.3 $H \rightarrow 2\ell 2\nu$

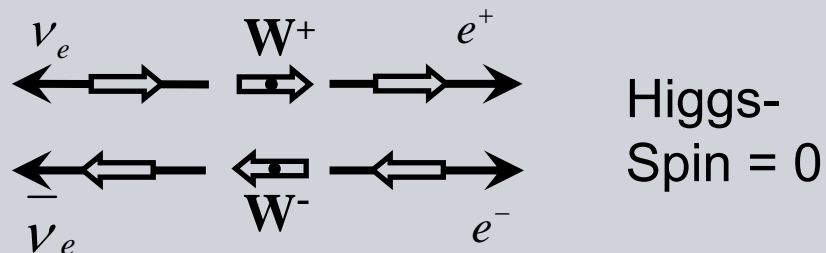


Unterdrückung des Hintergrunds durch:

- Beispiel für Jet-Veto-Mechanismus ( $tt$ ,  $tWb$ ): Jets aus  $q$  in Vorwärtsrichtung und Zerfallsprodukte des Higgs in der Zentralregion  $\rightarrow$  Higgs-Event
- Öffnungswinkel zwischen den Leptonen ( $\Phi_{||}$ ) für das Signal (blau) und den  $WW$ -Hintergrund (schwarz)



- Spinkorrelation  $\rightarrow$  Spin der Signal-Leptonen ist antiparallel



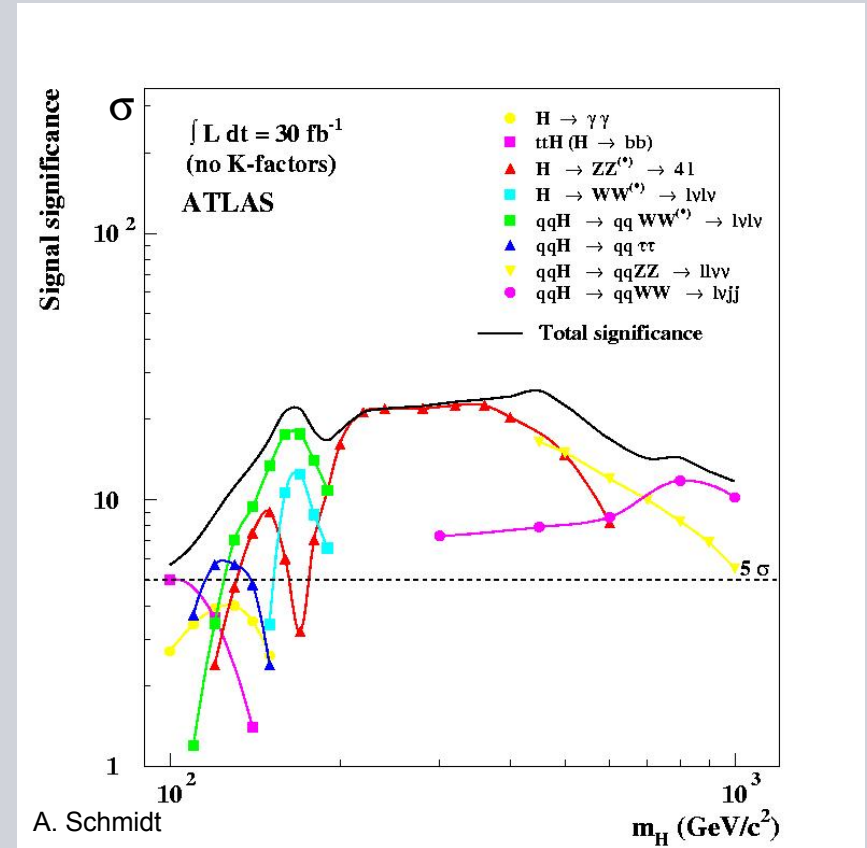
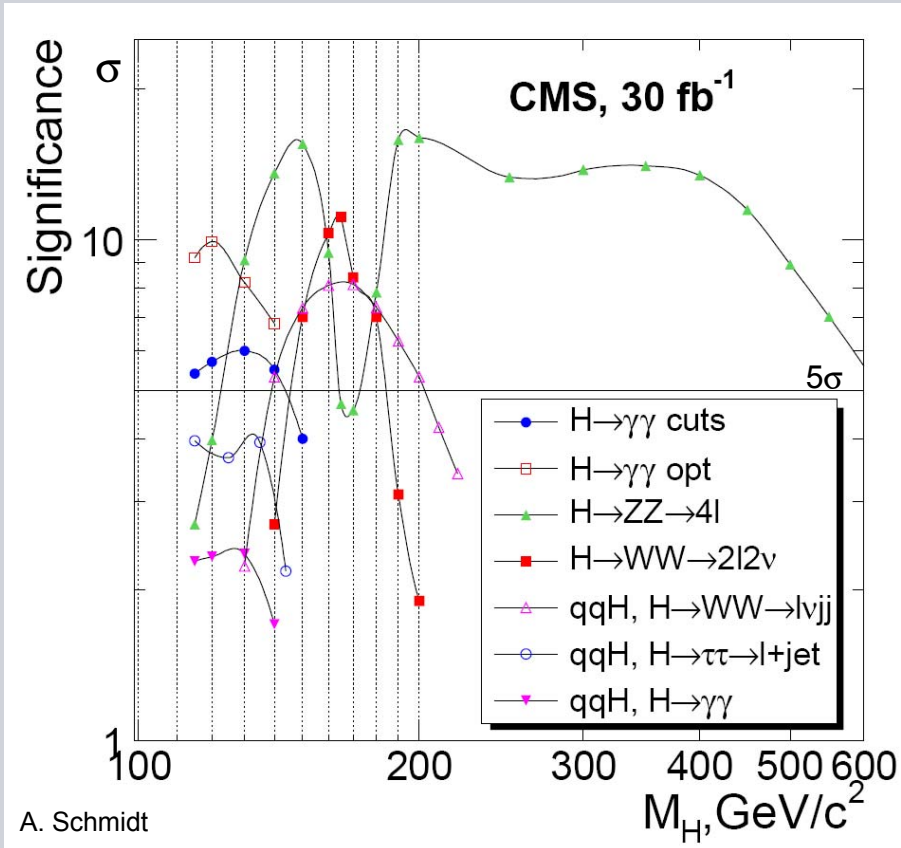
$\Rightarrow$  Entdeckungspotential für den Bereich:  $m_H \sim 160 \text{ GeV}/c^2$  (B.R.  $H \rightarrow WW$  95%)

# 3 Nachweis des Higgs-Bosons

## 3.6 Higgs-Entdeckungswahrscheinlichkeit am LHC



Signifikanz der versch. Zerfallskanäle des Higgs-Teilchens für die Detektoren CMS und ATLAS



⇒ Wenn das Higgs-Boson existiert wird es am LHC entdeckt werden!





## 4 References

- CERN: <http://cern.ch>
  - ATLAS Collaboration: <http://atlas.ch>
  - CMS Collaboration: <http://cms.cern.ch>
  - CERN Summer Student Lecture Programme 2007:  
<http://indico.cern.ch/tools/SSLPdisplay.py?stdate=2007-07-02&nbweeks=7>
    - Karl Jakobs, Physics at Hadron Colliders
    - Antonio Pich, The Standard Model
  
- B.R. Martin, G. Shaw, Particle Physics, second edition
- M. Maggiore, A Modern Introduction to Quantum Field Theory
- C. Berger, Elementarteilchenphysik
  
- P.W. Higgs, Phys. Rev. Lett. 13 (1964) 16, Phys. Rev. 145 (1966) 4
- A. Schmidt, Discovery Potential for the SM Higgs Boson in the Incl. Search Channels
- S. Rosati, Standard Model Higgs Boson Searches at ATLAS
- L.R. Flores Castillo, SM Higgs searches at LHC
- LHC Design Report, The Main Ring

# Die Higgs-Suche am LHC



Vielen Dank für Ihre Aufmerksamkeit!