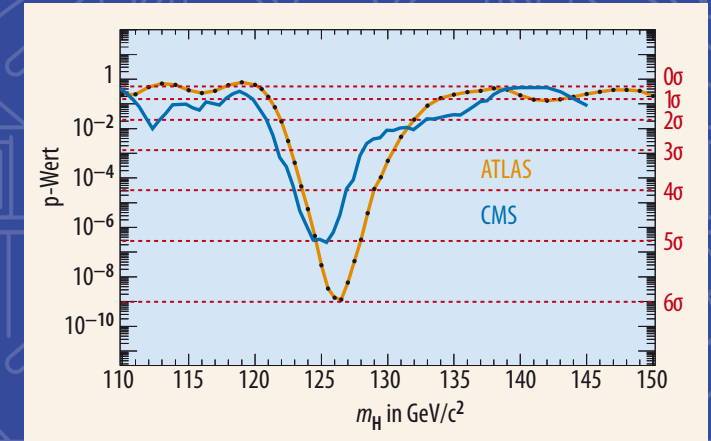
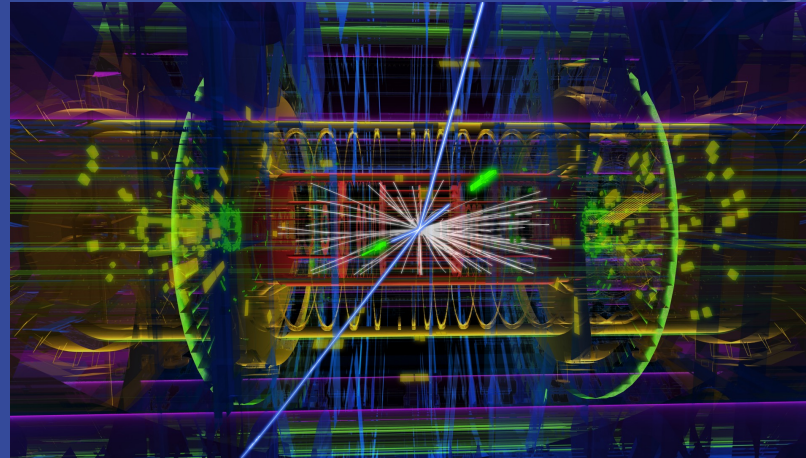
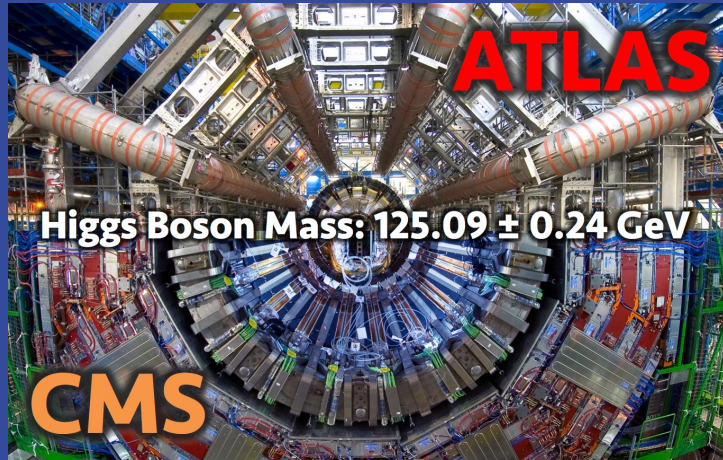
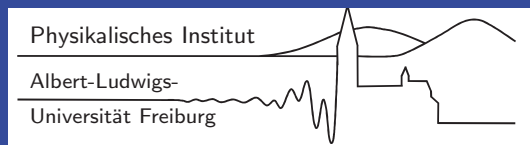


Der Nachweis des Higgs-Bosons am LHC



und ein kurzer Einblick in heutige Kenntnis über das „neue“ Teilchen

Prof. Markus Schumacher



Forschung trifft Schule:
CERN Summer School
4. August 2023

Gliederung der Vorlesung

- Motivation für und Inhalt des B.E.H.G.H.K-Mechanismus, Eigenschaften des Higgs-Bosons, Zerfall und Produktion am LHC
- Suche nach dem Higgs-Boson bis zur Entdeckung im Jahre 2012
- Heutiger Kenntnisstand und Higgs-Boson als Teleskop zu „neuer Physik“

Bitte jederzeit unterbrechen und direkt Fragen stellen.

Mein Vorschlag: zusätzlich kleine Pause für Diskussion nach jedem der Blöcke

Das Problem mit Elementarteilchenmassen vor 1964

Kräfte beschrieben durch Eichsymmetrien

elektroschwache Eichgruppen verbieten (zunächst) Massen für

-Eichbosonen: W und Z

-Fermionen (linkschiral $I_W=1/2$ Dublett, rechtschiral $I_W=0$ Singlett)

Bosonen	8 Gluonen	W^+, W^-, Z	γ
Gruppe	SU(3)	SU(2)	U(1)
Theorie	starke Kraft QCD	schwache Kraft	elektromagnetische Kraft QED

Experiment:

alle Teilchen massiv bis auf Gluon und Photon

(und eventuell 1 Neutrino als masselos angenommen im SM)

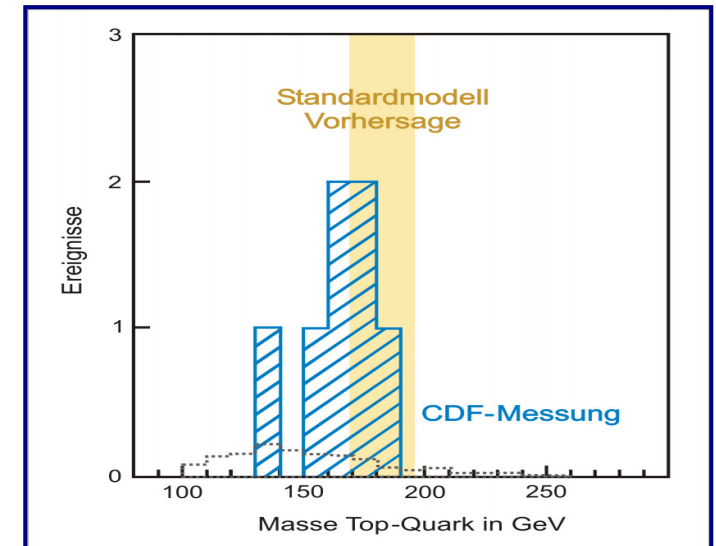
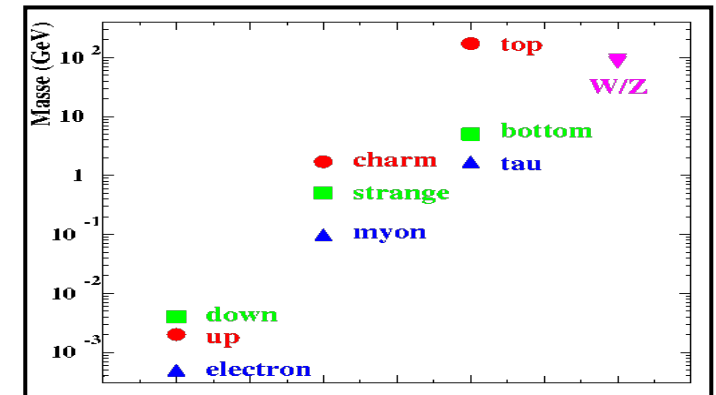
Naiver Experimentalphysiker:

Was kümmern mich Eichsymmetrien?

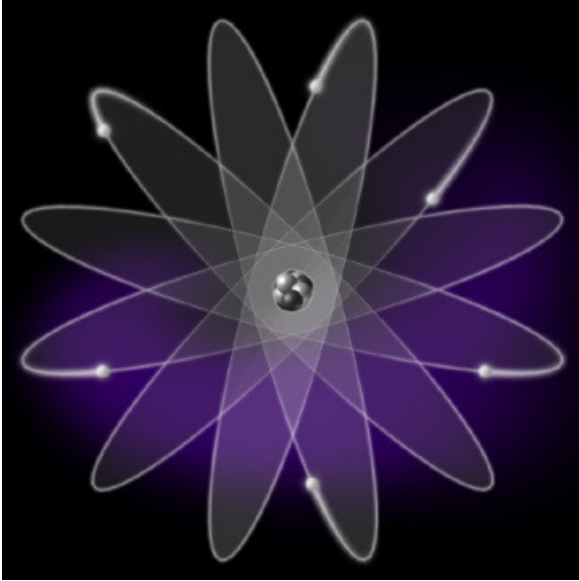
Füge Massenterme einfach hinzu und ignoriere Sorgen der Theoretiker

Einführung von „ad hoc“-Massenterme zerstören:

- Renormierbarkeit \rightarrow keine Präzisionsvorhersagen (aber Masse des Top-Quarks „gut“ vorhergesagt)
- Wahrscheinlichkeitsinterpretation von Wirkungsquerschnitten



Woher kommt unsere Masse?



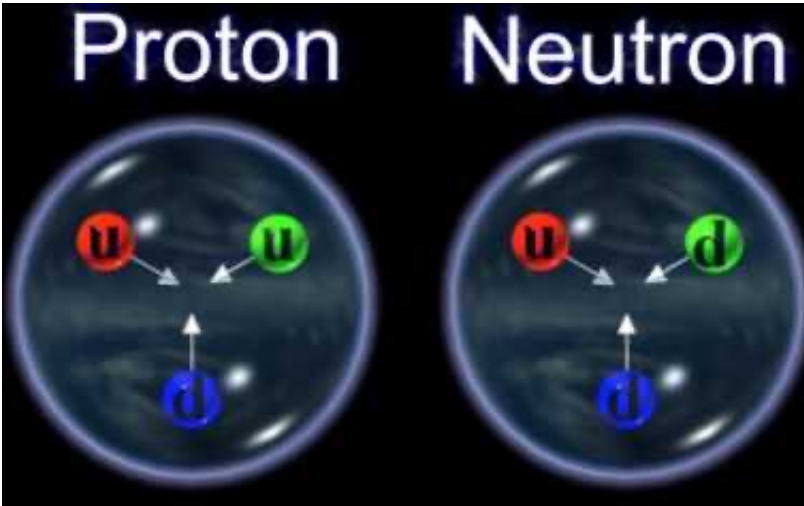
Atom = elementare Elektronen + Nukleonen (p,n) im Kern

$$m_N = 938(9) \text{ MeV} \quad m_e = 0.5 \text{ MeV}$$

Atom und Kern “leichter” als Summe der Konstituenten \rightarrow negative Bindungsenergie

$$\text{Heliumkern:} \quad \text{Masse} = 2m_p + 2m_n - E_{\text{bind.}} = 2 \times 938 \text{ MeV} + 2 \times 939 \text{ MeV} - 28 \text{ MeV}$$

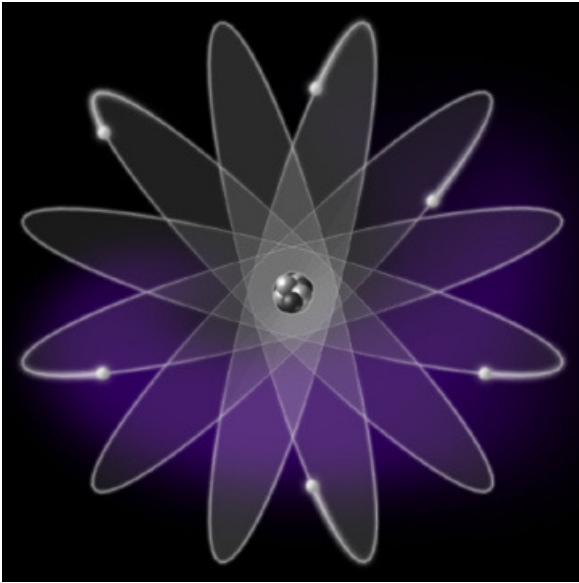
$$\text{Wasserstoffatom:} \quad \text{Masse} = m_p + m_e - E_{\text{bind.}} = 938 \text{ MeV} + 511 \text{ keV} - 13.4 \text{ eV}$$



$$\text{Nukleon (p/n):} \quad \text{Masse} = 3 m_q - E_{\text{bind.}} = ?$$

$$\text{aber } m_q = 1 \text{ bis } 6 \text{ MeV} \quad m_d \sim 2 \times m_u$$

Woher kommt unsere Masse?



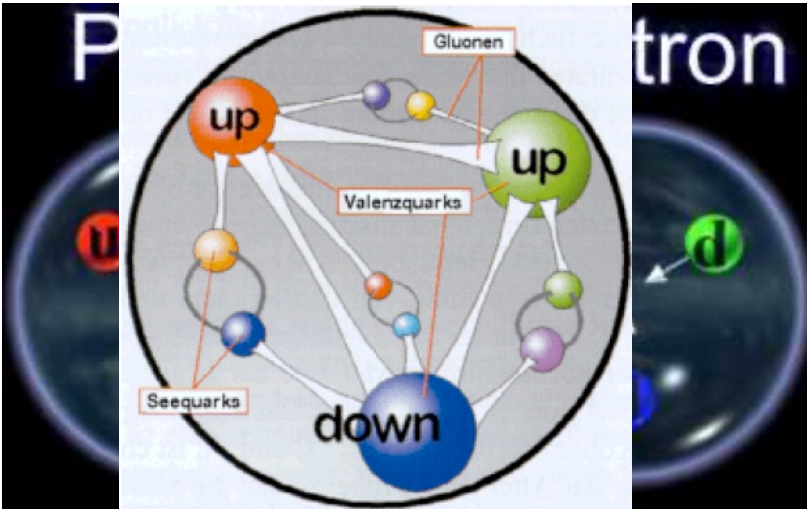
Atom = elementare Elektronen + Nukleonen (p,n) im Kern

$$m_N = 938(9) \text{ MeV} \quad m_e = 0.5 \text{ MeV}$$

Atom und Kern “leichter” als Summe der Konstituenten \rightarrow negative Bindungsenergie

$$\text{Heliumkern:} \quad \text{Masse} = 2m_p + 2m_n - E_{\text{bind.}} = 2 \times 938 \text{ MeV} + 2 \times 939 \text{ MeV} - 28 \text{ MeV}$$

$$\text{Wasserstoffatom:} \quad \text{Masse} = m_p + m_e - E_{\text{bind.}} = 938 \text{ MeV} + 511 \text{ keV} - 13.4 \text{ eV}$$



$$\text{Nukleon (p/n):} \quad \text{Masse} = 3 m_q - E_{\text{bind.}} = ?$$

$$\text{aber } m_q = 1 \text{ bis } 6 \text{ MeV} \quad m_d \sim 2 \times m_u$$

Rest: $m = E/c^2$ „Energie“ der starken Kraft (g,q, QCD-Vakuum)

Unsere Masse nur auf O(%) aus Massen von Quarks und Elektronen
(und damit aus dem B.E.H.G.H.K.-Mechanismus)

Bedeutung der Massen von Elementarteilchen (Bsp.)

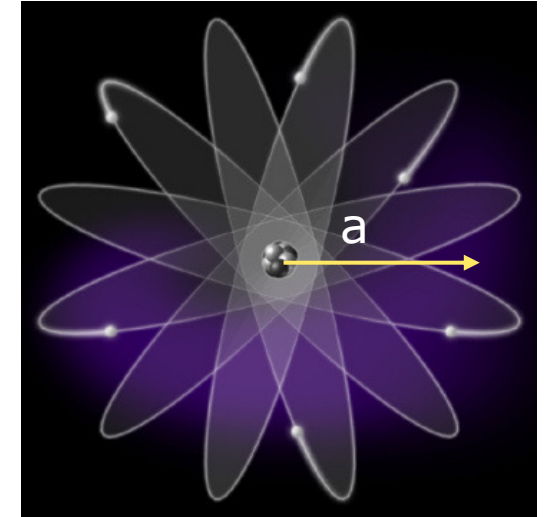
Elektronmasse ($m_e = 511 \text{ keV}$):

def. Längenskala unserer Welt, Bohrradius $a = 1 / \alpha_{em} m_e$

$m_e = 0$ keine Atombindung

$m_e = 0.02 \text{ MeV}$ menschliche Riesen 45 m, sichtbares Licht im Infrarot

$m_e = 105 \text{ MeV}$ K-Einfang $p \rightarrow n + \nu$ energetisch möglich
→ nur Helium, $n + \nu \rightarrow$ anderes Universum



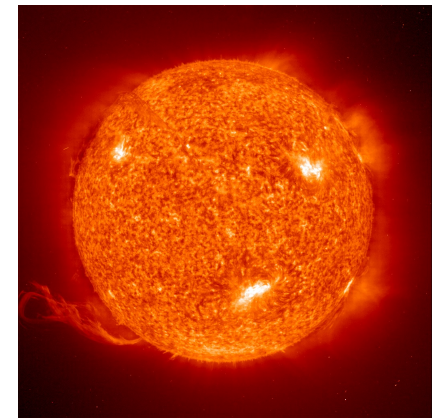
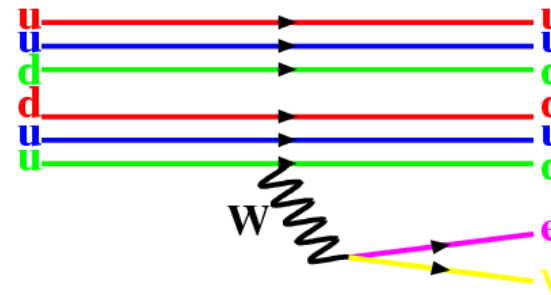
keine/kleine W-Bosonmasse ($M_W = 81 \text{ GeV}$)

Fusion in Sternen: $p + p \rightarrow d + e + \nu$

Reaktionsstärke: $G_F \sim (M_W)^{-2}$

→ kürzere Brennzeit der Sonne bei niedriger Temperatur

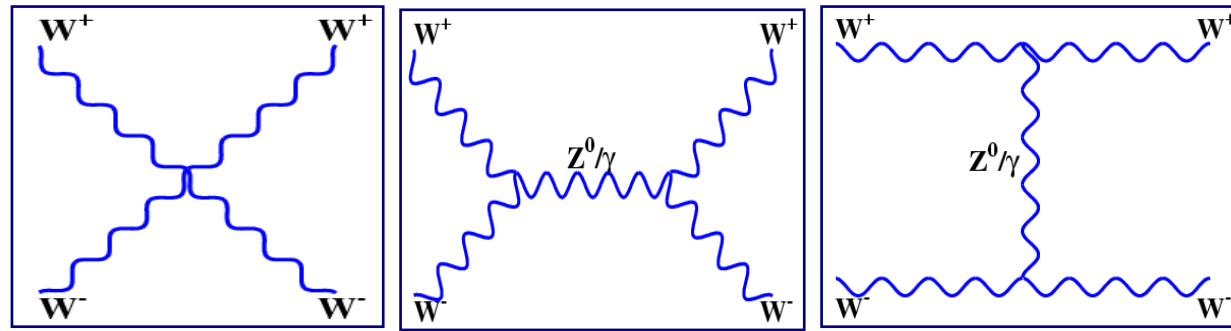
→ keine Menschen auf der Erde



Massenwerte und deren Feinabstimmung lebensnotwendig für Entstehung und Entwicklung unseres Universums

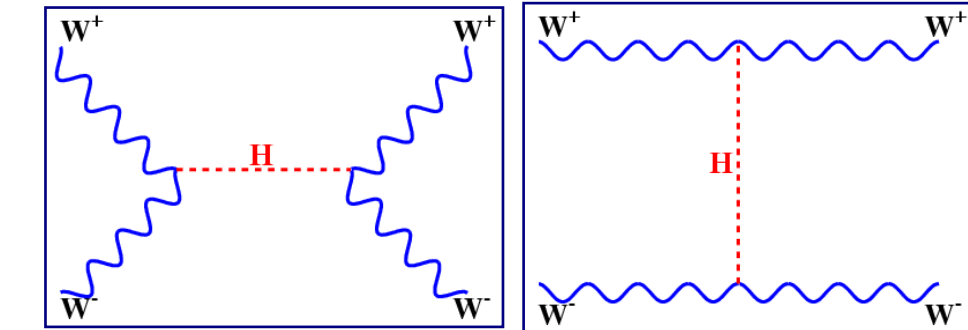
Verletzung der Unitarität in $WW \rightarrow WW$ -Streuung

Diagramme für WW -Streuung

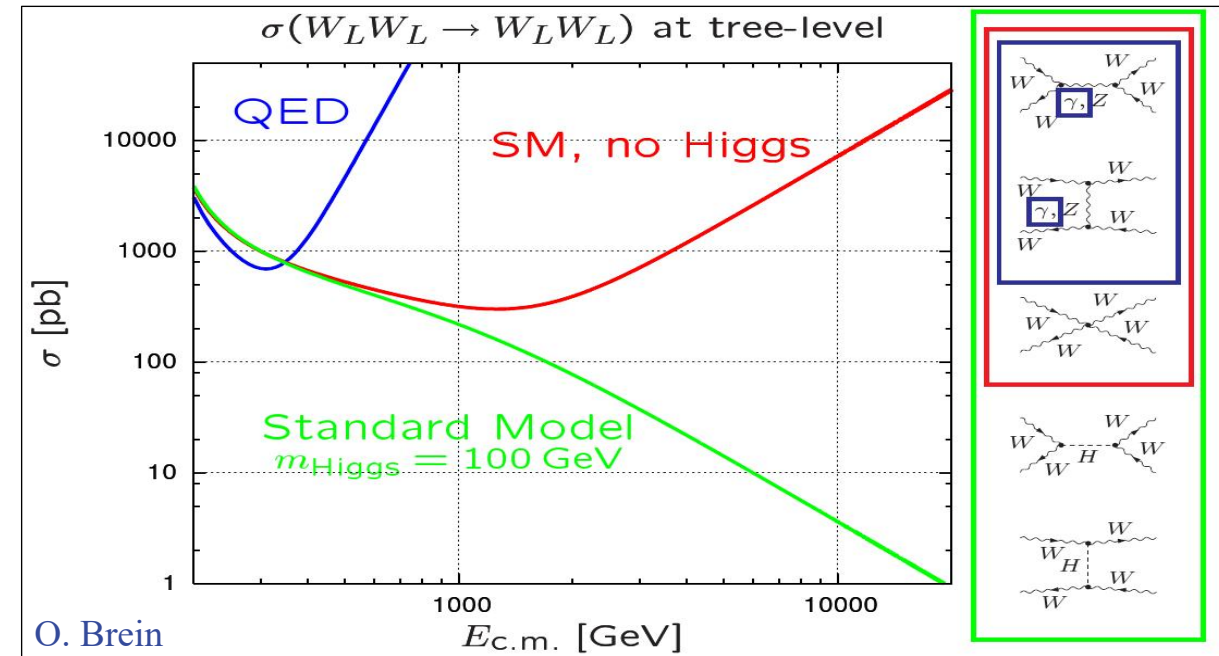


masseloses W/Z: nur 2 transversale Freiheitsgrade (FG)
 massives W/Z: 2 transversale FG
 plus 1 longitudinaler FG (Problem!)

Neue Diagramme mit **skalarem Teilchen H**



Streuung massiver W-Bosonen **verletzt Unitarität** bei $E_{CM} \sim 1.2$ TeV (und damit Wahrscheinlichkeitsinterpretation von Wirkungsquerschnitten)



Skalares Teilchen H restauriert Unitarität, wenn $g_{HWW} \sim M_W$ und $M_H < 750$ GeV (ähnliches Argument liefert $g_{Hff} \sim m_f$)

Vor mittlerweile fast 60 Jahren war die Zeit wohl reif ...

F.Englert and R.Brout;



G.S.Guralnik, C.R.Hagen and T.W.B.Kibble;



P.W.Higgs



Unabhängige Publikationen durch drei Teams in selber Ausgabe eines Fachjournals

Zunächst formuliert, um U(1)-Eichfeld Masse zu geben.

(Kibble 1967 erweitert auf nicht-abelsche Theorien)

Nur P.W. Higgs nennt explizit Existenz eines neues Teilchens

→ B.E.H.(G.H.K.)-Mechanismus
→ aber Higgs-Boson

F.Englert and R.Brout

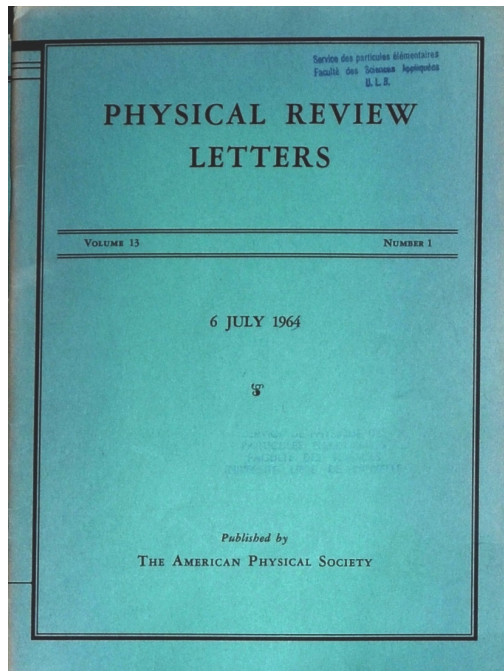
Phys. Rev. Lett. 13-[9], 321-323 (1964)
Broken Symmetry and the Mass of Gauge Vector Mesons

P.W.Higgs

Phys. Rev. Lett. 13-[16], 508-509 (1964)
Broken Symmetries and the Masses of Gauge Bosons

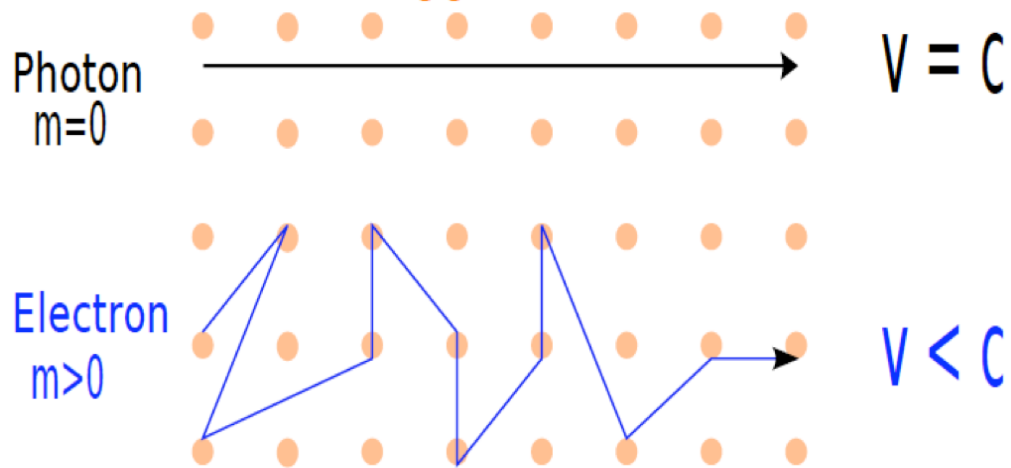
G.S.Guralnik, C.R.Hagen and T.W.B.Kibble

Phys. Rev. Lett. 13-[20], 585-587 (1964)
Global Conservation Laws and Massless Particles



Masse durch Wechselwirkung mit Kondensat/Äther

Higgs - Field

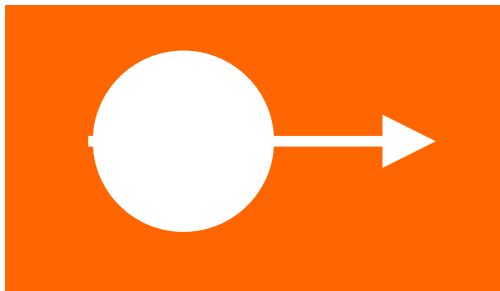


effektive Masse durch Wechselwirkung mit omnipräsentem, homogenem Kondensat eines skalaren Feldes
skalar/ Spin=0: sonst bricht Kondensat die Isotropie des Raumes

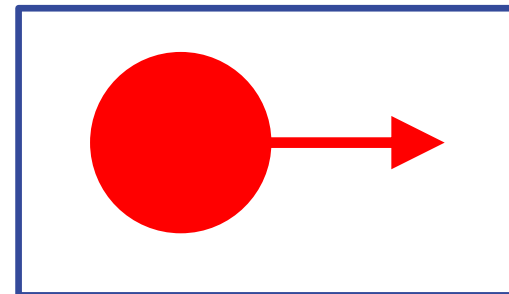
Stärke des Kondensats
(Vakuumerwartungswert v)
bekannt aus Fermikonstante G_F

$$v = (\sqrt{2}G_F)^{-1/2} = 246 \text{ GeV}$$

Zwei äquivalente Sichtweisen:



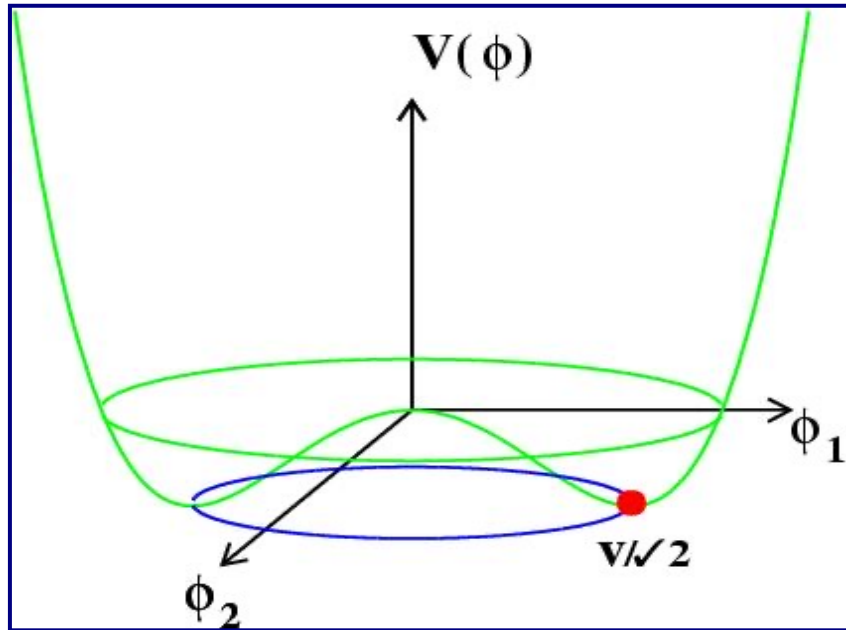
„masselose“ Teilchen
wechselwirken mit
„sichtbarem“ Higgs-Äther



massive Teilchen und
unsichtbarer Higgs-Äther

Teilchenmasse = Kopplung $\times v$

Der B.E.H.G.H.K.-Mechanismus im Standardmodell



Ökonomische Lösung im Standardmodell: $\Phi = \begin{pmatrix} \Phi_3 + i\Phi_4 \\ \Phi_1 + i\Phi_2 \end{pmatrix}$ Φ_i reell $Y = 1, I_W = \frac{1}{2}$

4 skalare Freiheitsgrade (FG) in einem Dublett des schwachen Isospins
3 für longitudinale FG von W^\pm, Z und einer 1 für Reparatur der Unitarität

mit allgemeinstem eichinvariantem und renormierbarem Potential:

$$V = -\mu^2 |\phi^+\phi| + \lambda |\phi^+\phi|^2 \quad \mu^2, \lambda > 0$$

Minimum von V nicht bei $\phi=0$

3 masselose Anregungen entlang Mulde

1 massive Anregung senkrecht zur Mulde

→ spontane Symmetriebrechung/versteckte Symmetrie

→ 3 longitudinale FG für W^\pm und Z

→ physikalisches Higgs-Boson

Higgs-Feld hat zwei “Komponenten”

1) homogenes Kondensat $v = 247 \text{ GeV}$

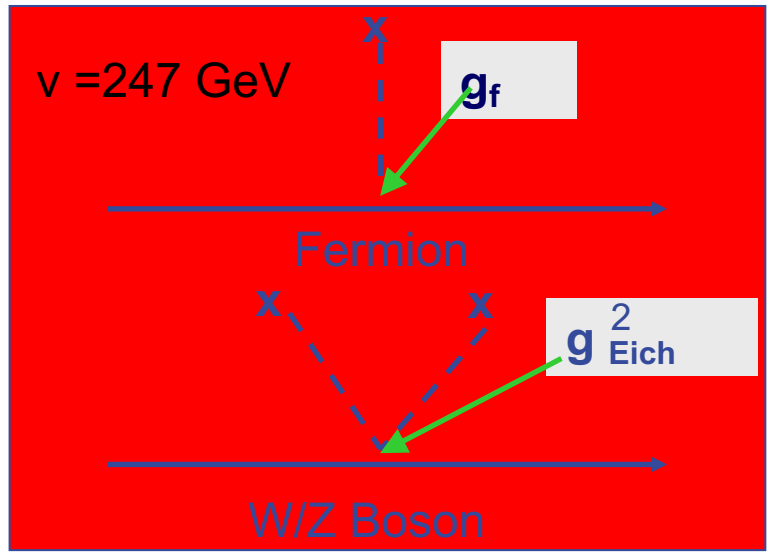
2) Higgs-Boson H mit unbekannter M_H

→ nicht direkt nachweisbar

→ Suche an Beschleunigern

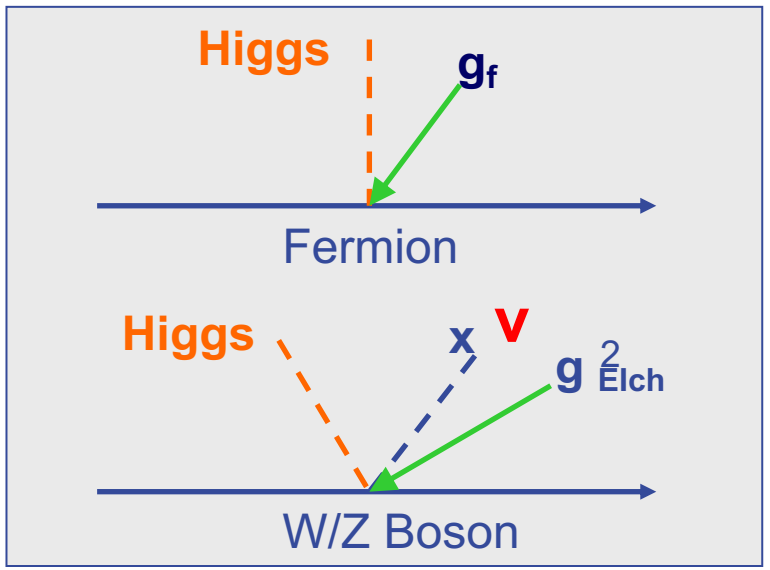
Massenerzeugung und Higgs-Kopplungen: $\Phi = v + H$

Wechselwirkung mit dem **Kondensat**



$m_f \sim g_f v$ Yukawa-Kopplung
 $M_V \sim g v$ Eichkopplung

Wechselwirkung mit dem **Higgs Boson H**



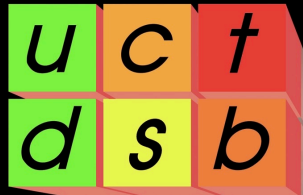
Fermion: $g_f \sim m_f / v$
 W/Z-Boson: $g_V \sim g M_V / v = g^2 v$

Da Massen der Teilchen und Eichkopplung bekannt, sind Kopplungen des Higgs-Bosons festgelegt

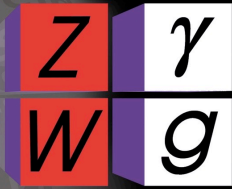
1 freier unbekannter Parameter in SM: die Masse des Higgs-Bosons $M_H = v \sqrt{2\lambda} = \sqrt{2}\mu$

Ohne das Higgs-Boson ist das Standardmodell nicht komplett

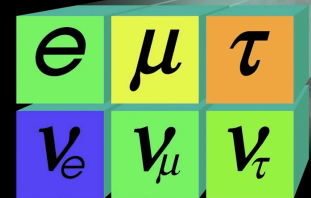
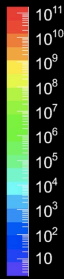
Quarks



Forces



mass [eV]



Leptons

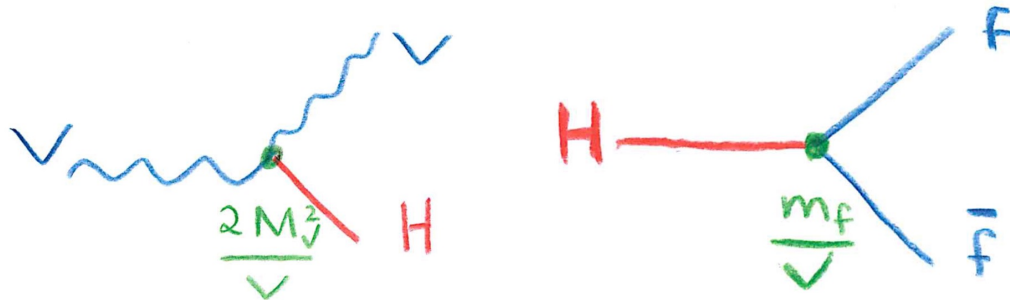
$$\begin{aligned} \mathcal{L}_{EW}^{SM} = & -\frac{1}{4} W_{\mu\nu}^a W_a^{\mu\nu} - \frac{1}{4} B_{\mu\nu} B^{\mu\nu} \\ & + \bar{L} \gamma^\mu \left(i\partial_\mu - \frac{1}{2} g \tau_a W_\mu^a - \frac{1}{2} g' Y B_\mu \right) L \\ & + \bar{R} \gamma^\mu \left(i\partial_\mu - \frac{1}{2} g' Y B_\mu \right) R \\ & - \left| \left(i\partial_\mu - \frac{1}{2} g \tau_a W_\mu^a - \frac{1}{2} g' Y B_\mu \right) \Phi \right|^2 \\ & + \mu^2 |\Phi|^2 - \lambda |\Phi|^4 \\ & - (\sqrt{2} \lambda_d \bar{L} \Phi R + \sqrt{2} \lambda_u \bar{L} \Phi_c R + h.c.) \end{aligned}$$

B.E.H.G.H.K.-Mechanismus mit Higgs-Feld erlaubt konsistente Beschreibung von Teilchenmassen

Higgs-Boson ist Anregung des Higgsfeldes

Im SM ist das komplette Profil des Higgs-Bosons festgelegt, wenn wir seine Masse kennen

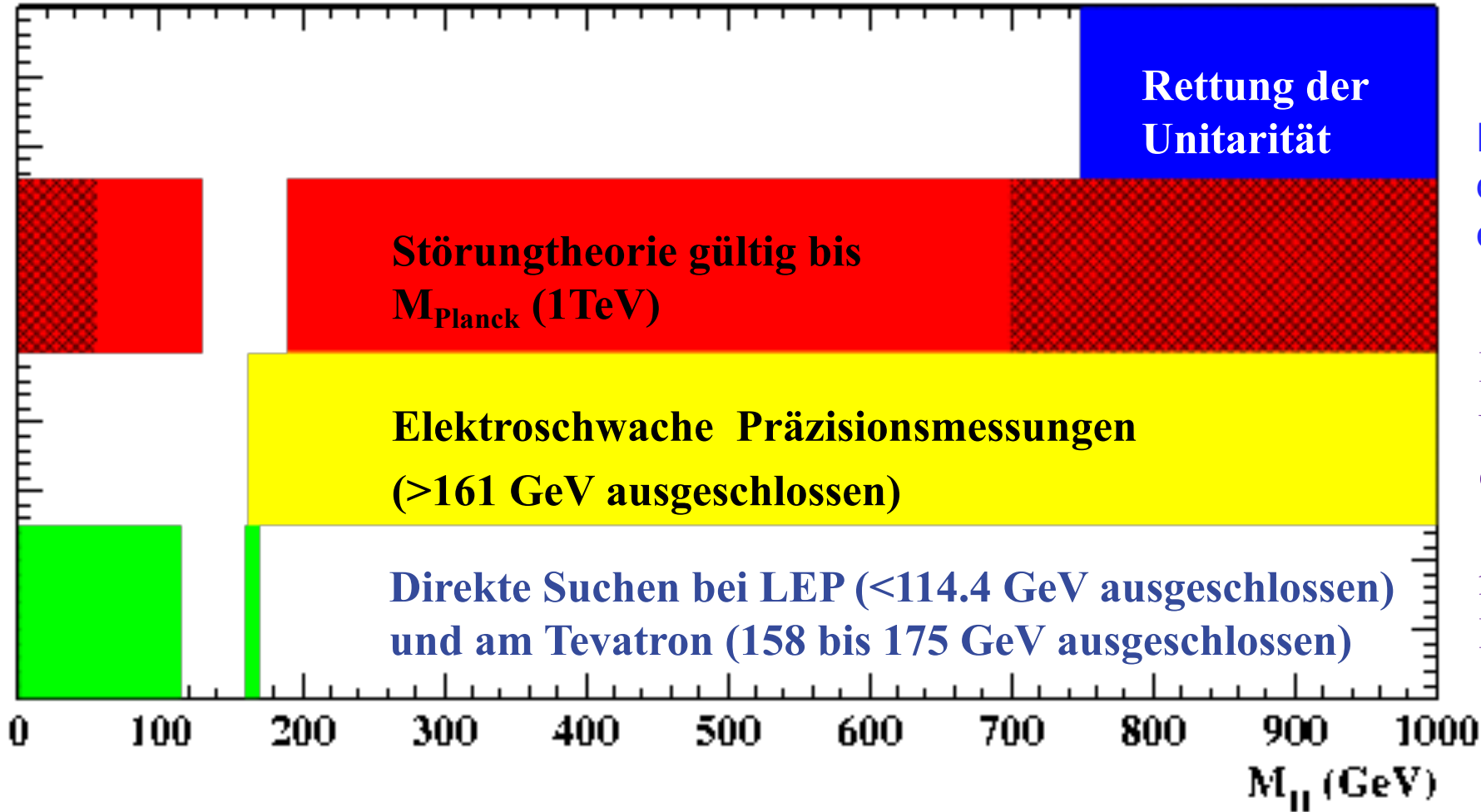
Kopplung des Higgs-Bosons an andere Teilchen fixiert durch Teilchenmasse und vev



Higgs-Boson-Masse

beeinflusst Produktionsraten und Zerfallswahrscheinlichkeiten nur über Phasenraum (und Higgs-Boson-Selbstkopplungen)

Kenntnis über Masse des Higgs-Bosons vor Start des LHC



Fazit:

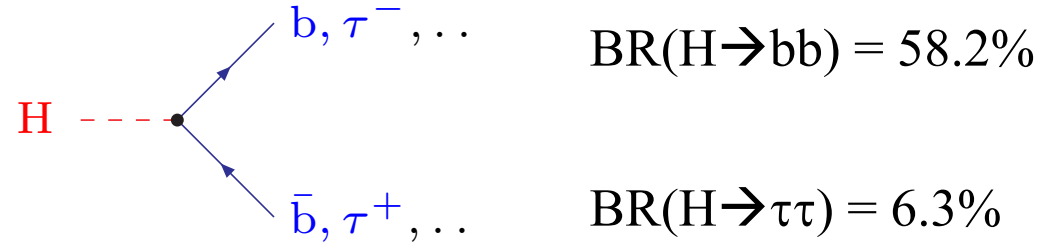
das Standardmodell bevorzugt ein leichtes Higgs-Boson

Design von LHC, ATLAS- und CMS-Experimente so, dass Bereich von 110 GeV bis 1000 GeV für Entdeckung nach spätestens drei Jahren Datennahme abgedeckt ist

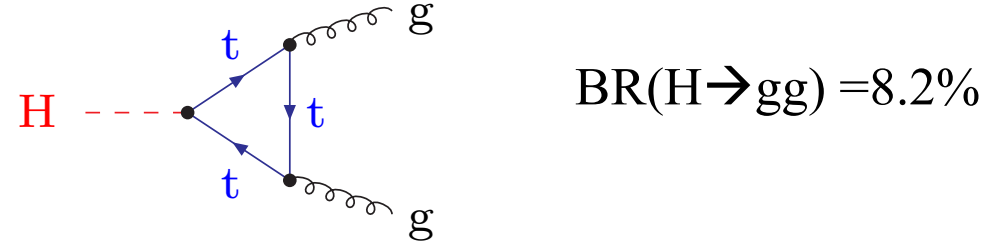
Nach Analyse der Daten aus 2011 vom LHC nur Bereich $116 < M_H < 130$ GeV nicht ausgeschlossen
→ Fokussierung auf diesen Massenbereich im Folgenden

Zerfälle des Higgs-Bosons: Verzweigungsverhältnisse (BR)

- Higgs-Boson zerfällt quasi sofort
(für $M_H=125$ GeV, Lebensdauer 10^{-22} s)
- Kopplung an Teilchen proportional zu Masse

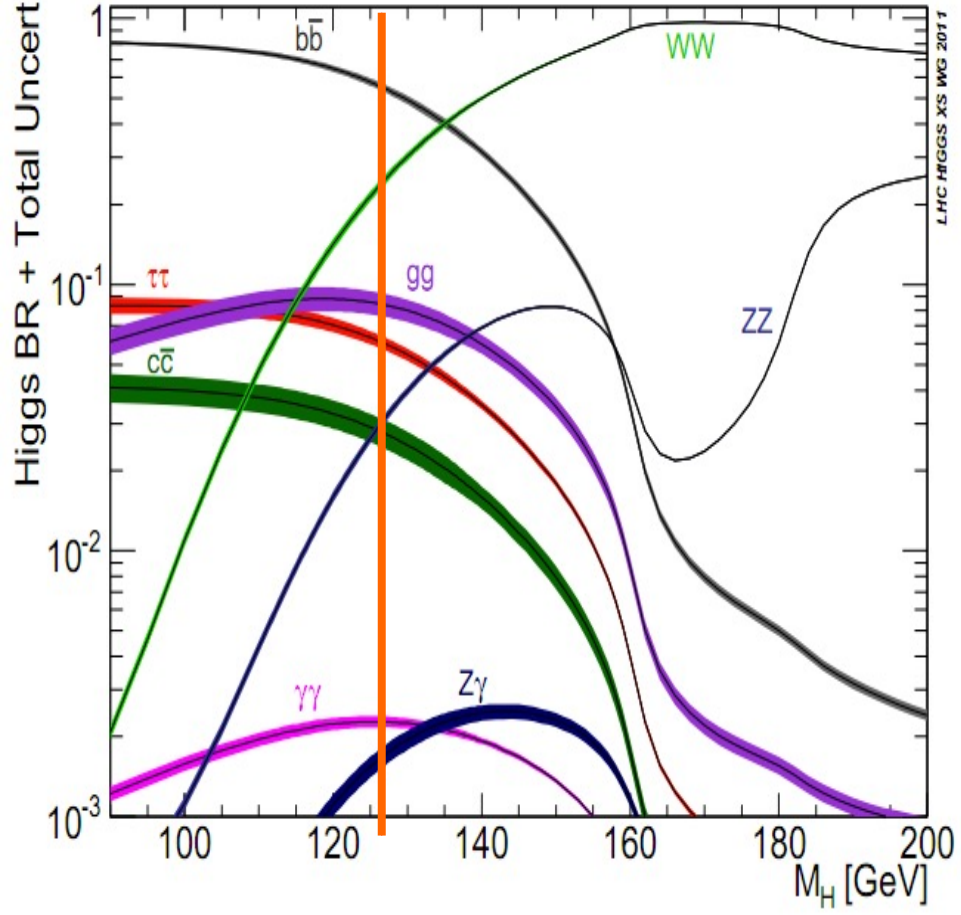


b-quarks hadronisieren in Jets
 τ -Leptonen zerfallen nach 290 fs in $\nu + X$
 → Massenauflösung für Higgs-Boson nur 10 bis 20%

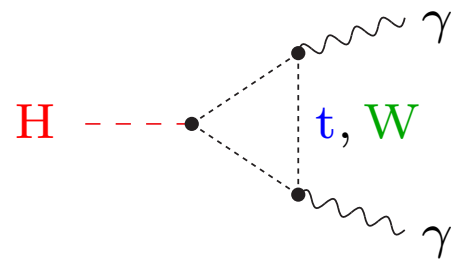
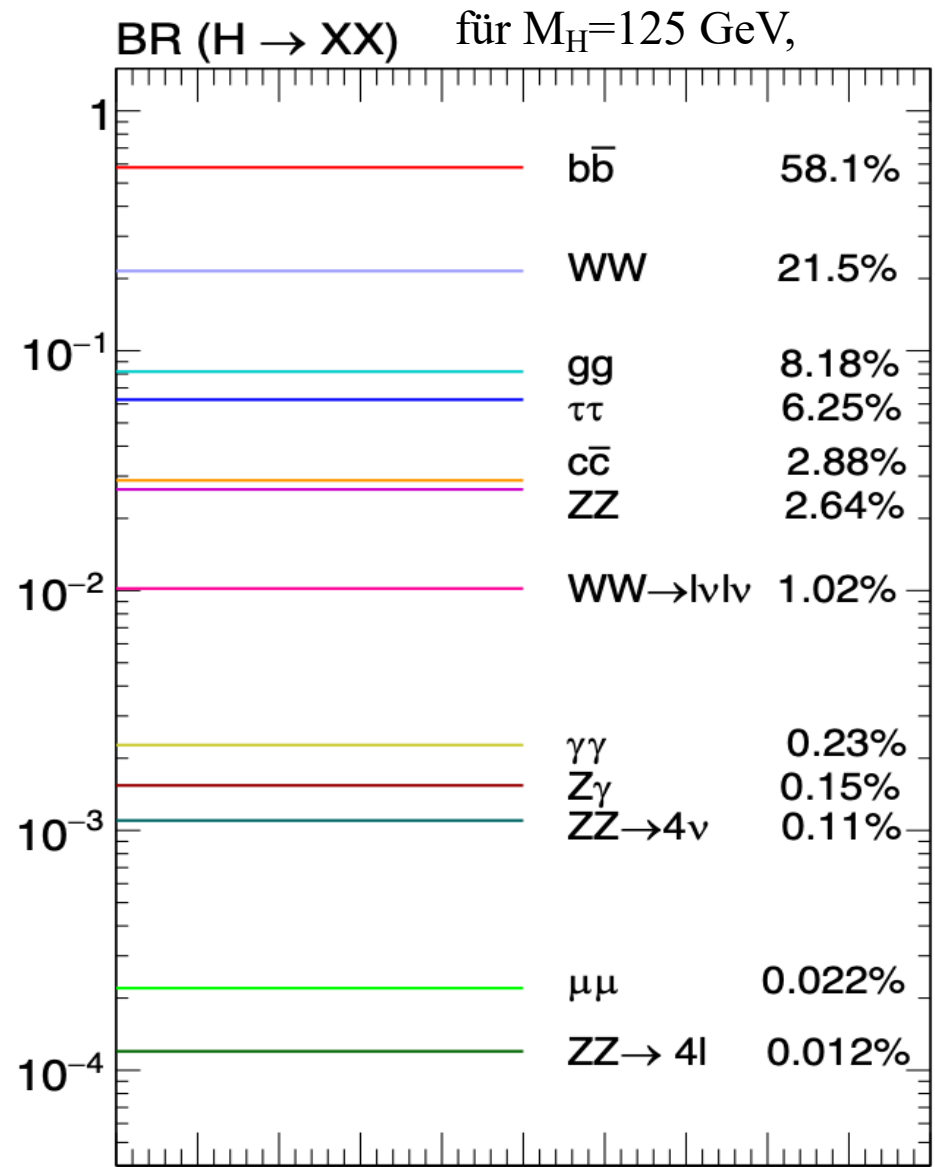


Massenauflösung für Higgs-Boson auch nur 10 bis 20%
 Keine Möglichkeit Untergrund zu unterdrücken

alle drei Zerfallsmoden sind keine Entdeckungskanäle

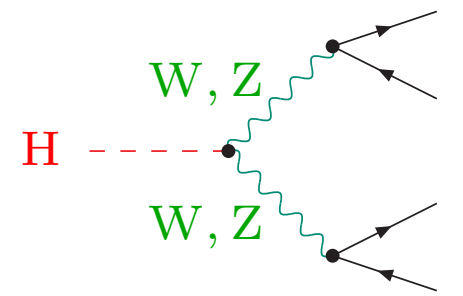


Zerfälle des Higgs-Bosons: Verzweigungsverhältnisse (BR) 2



BR (H → $\gamma\gamma$) = 0.23 %

Massenauflösung für Higgs-Boson 1 bis 2%



BR (H → WW) = 21.5 %

BR (H → ZZ) = 2.6 %

Zerfälle Z(W) → qq nicht nutzbar → leptonische Zerfälle

BR(H → WW → $2l2\nu$ (l=e, μ)) = 1.02%

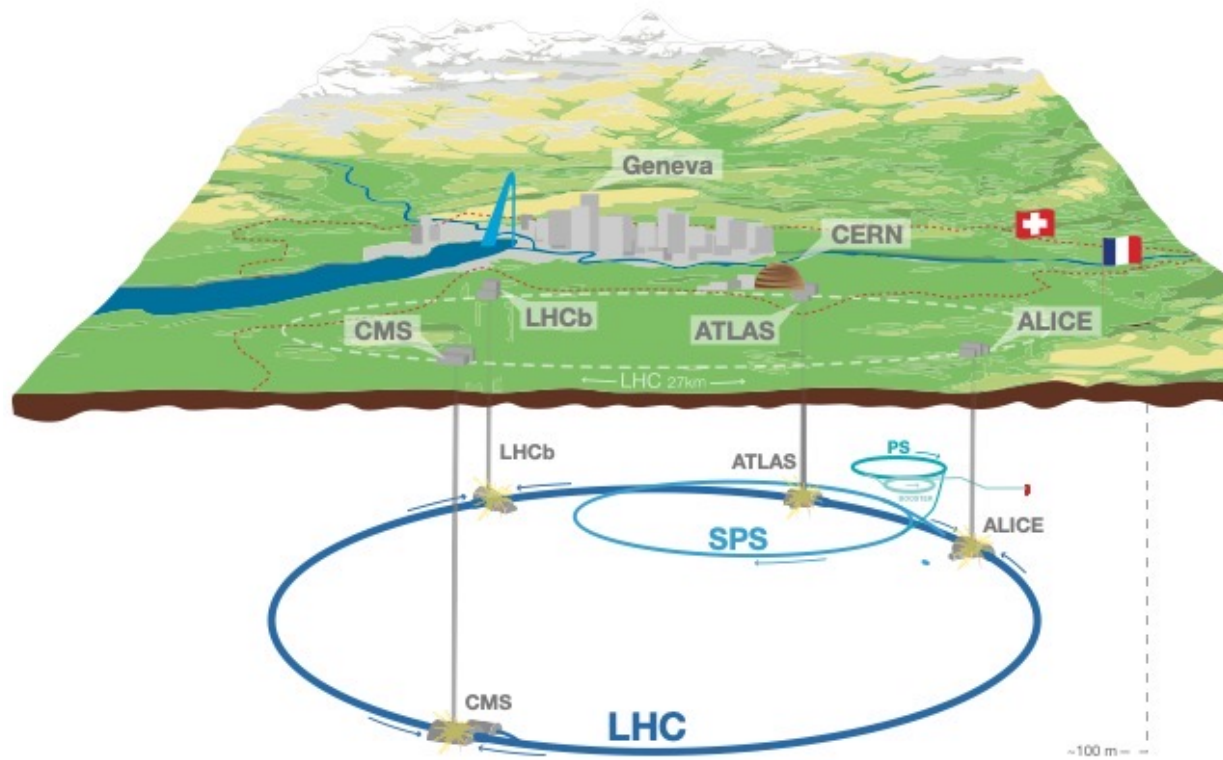
keine Rekonstruktion der Masse wegen Neutrinos

BR(H → ZZ → $4l$ (l=e, μ)) = 0.012%

Massenauflösung für Higgs-Boson 1 bis 2%

dies sind die drei bosonischen Entdeckungskanäle

Proton-Proton Kollisionen am LHC



In Run-1 in 2011(12):

Protonenergien von 3,5 (4) + 3,5 (4) TeV

→ pp-Schwerpunktsenergie $\sqrt{s} = 7$ (8) TeV

(Run-2 2015-2018: 13 TeV, Run-3 seit 2022 13,6 TeV)

Protonen zusammengesetzt aus Quarks und Gluonen
Diese Partonen kollidieren und produzieren Teilchen

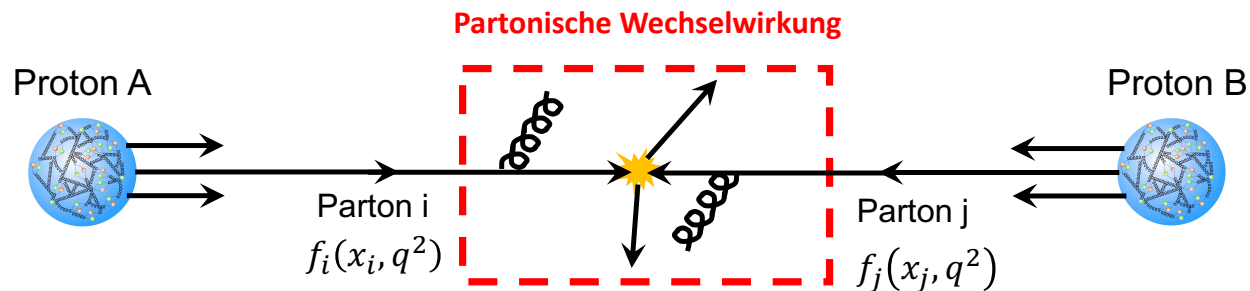
Partonen tragen Impulsbruchteil x am Protonimpuls

$A(x_A) + B(x_B) \rightarrow$ Endzustand z.B. Higgs + X
partonische Schwerpunktsenergie

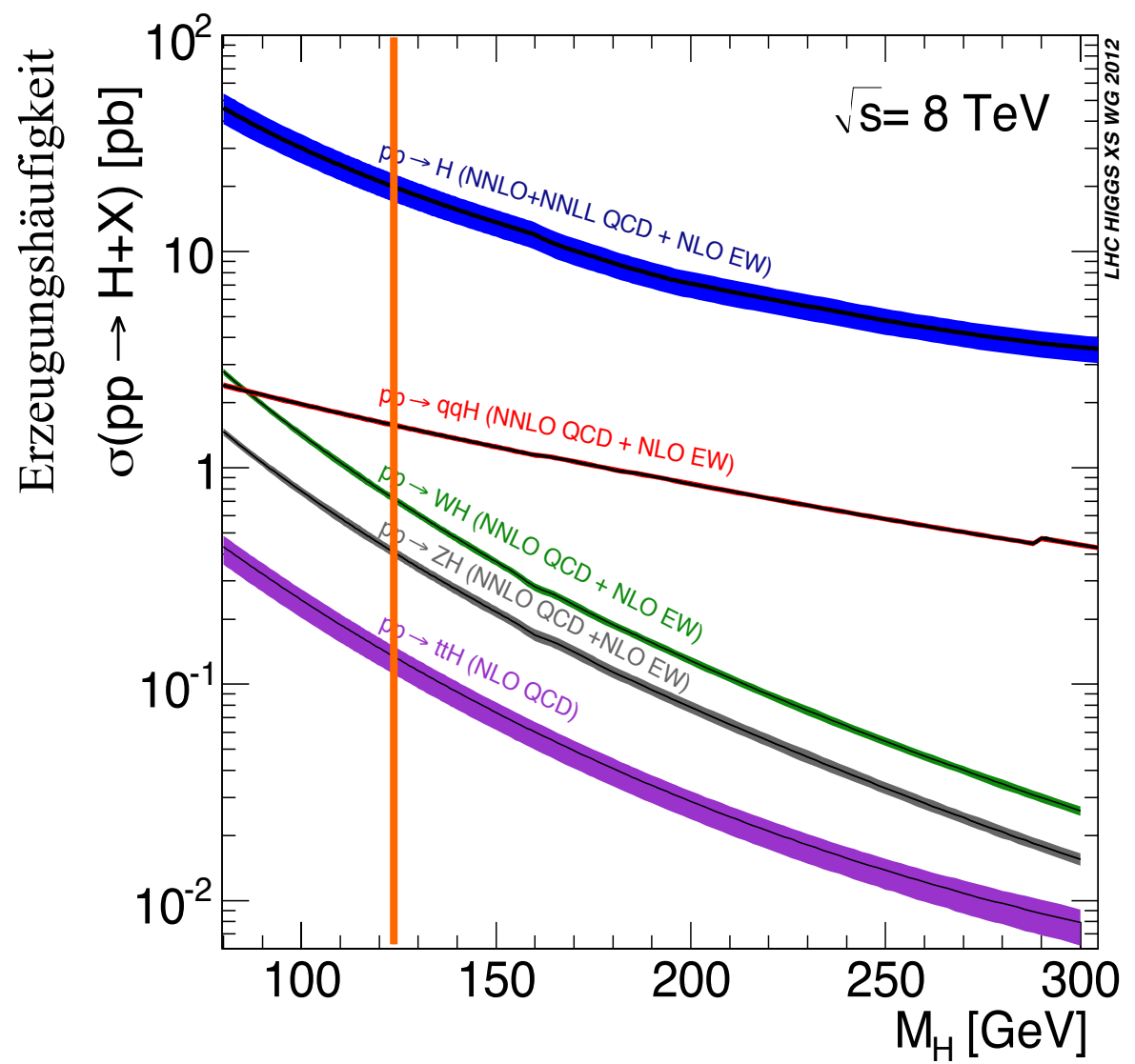
$$\sqrt{s}_{\text{parton}} = \sqrt{(x_A * x_B * s_{PP})}$$

Partondichteverteilungen beschreiben
Wahrscheinlichkeit Parton der Spezies i mit
Impulsbruchteil x_i im Proton zu finden

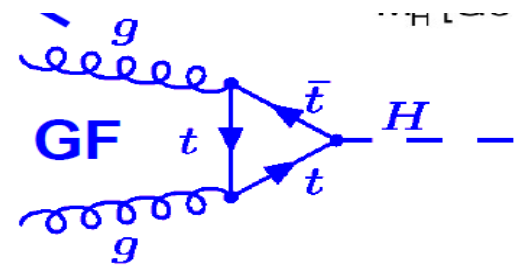
Partonprozess aus Feynmandiagrammen berechnet



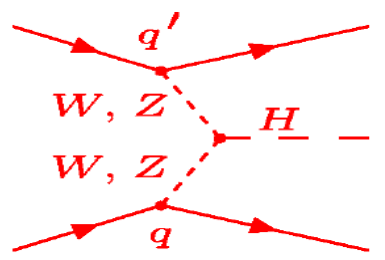
Produktion des SM Higgs-Bosons am LHC



Dominant: Gluon-Gluon-Fusion (GF)



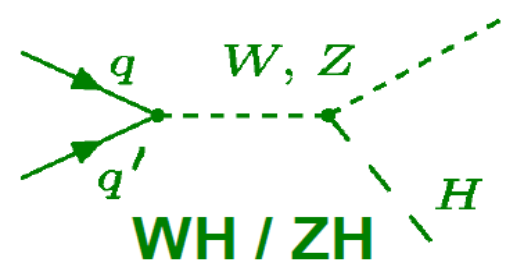
VBF Vector Boson Fusion (~Faktor 10 seltener)



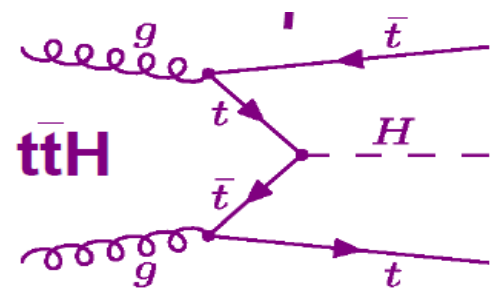
zusätzliche Signatur im Detektor durch auslaufende Quarks

Noch kleinere Produktionsraten und daher unwichtig für Entdeckung

Higgsstrahlung VH

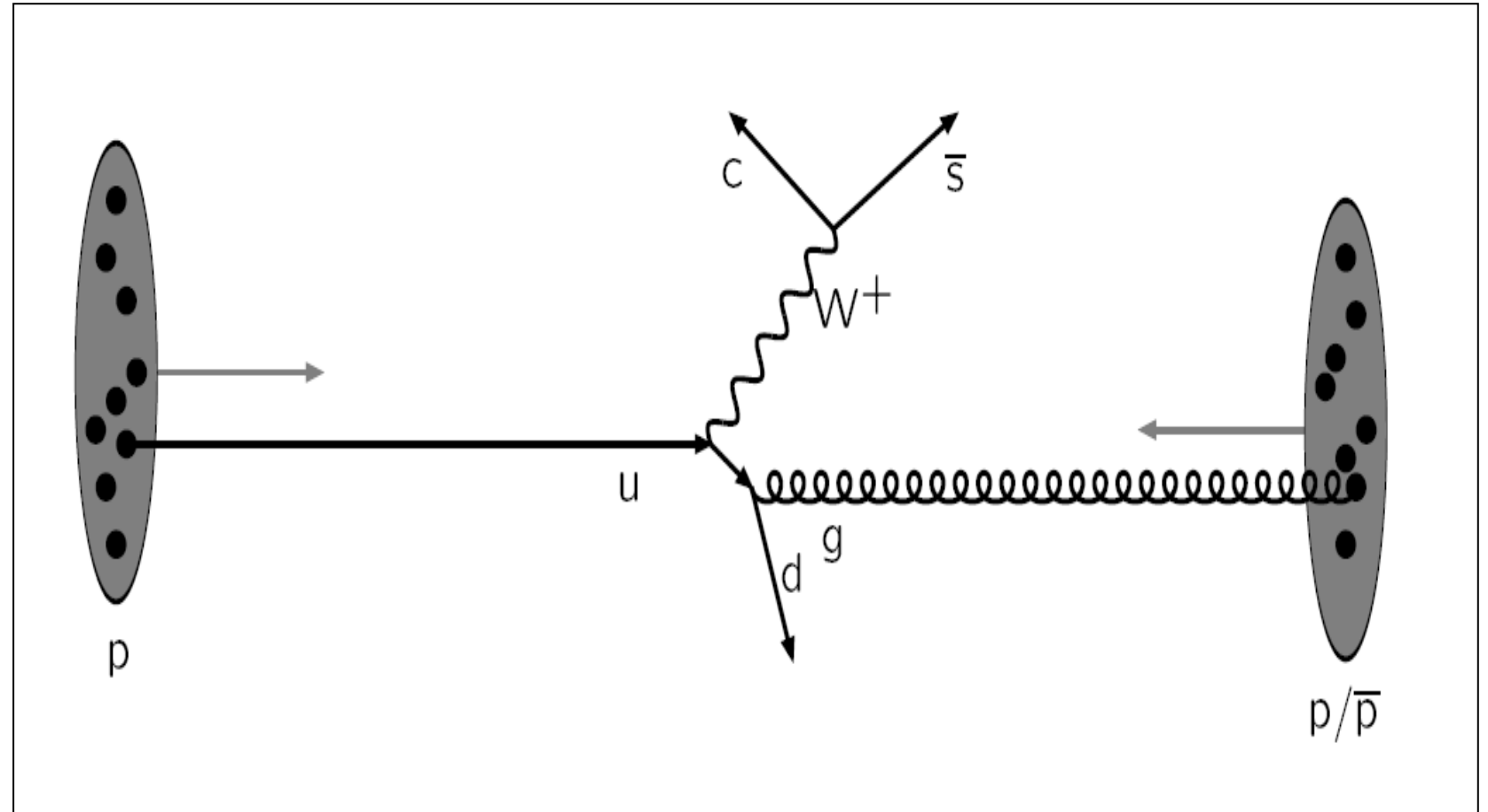


ttH



Ein komplettes Ereignis am LHC

„harte“ Kollision

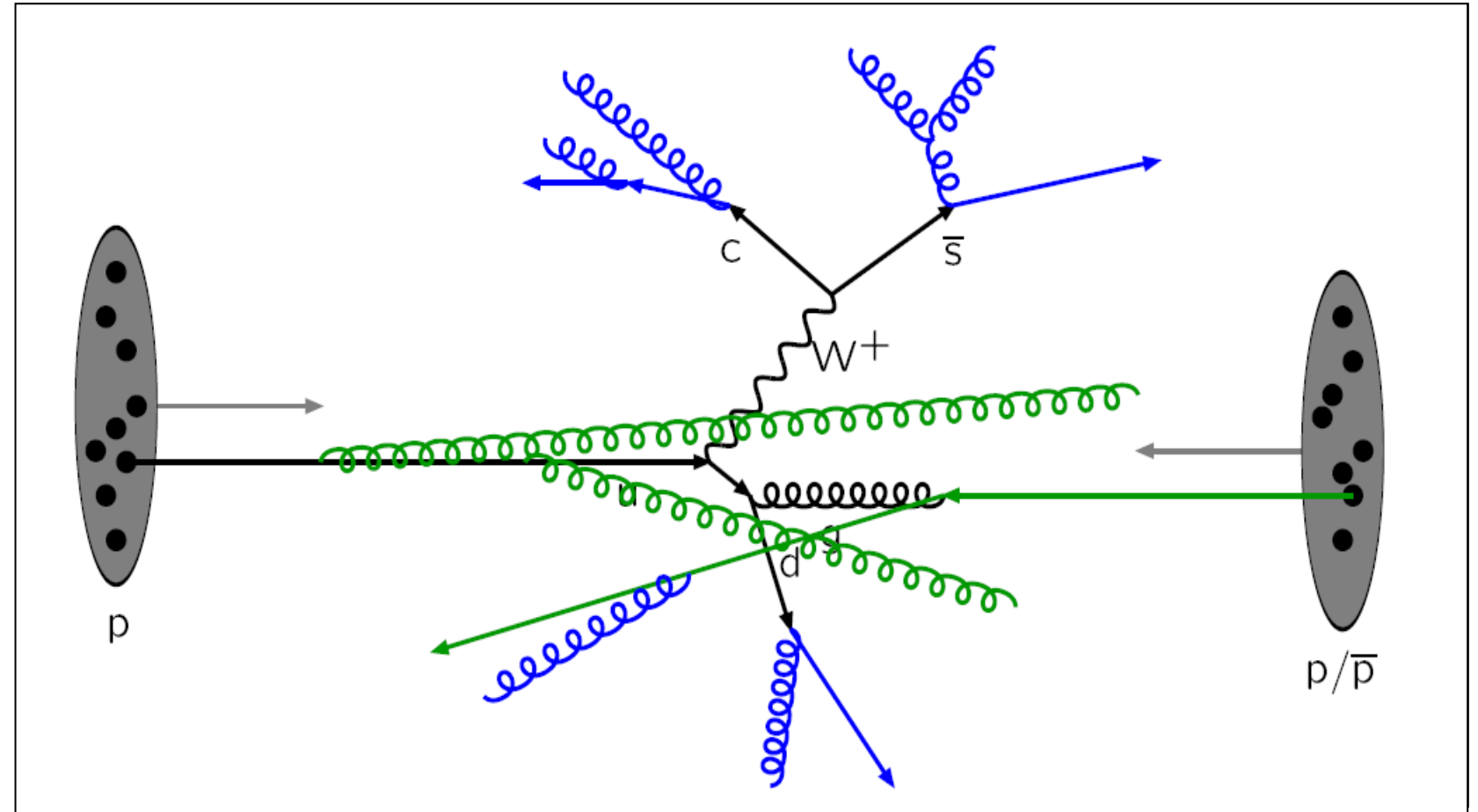


Ein komplettes Ereignis am LHC

„harte“ Kollision

+ ISR, FSR

Abstrahlung von Gluonen
im „Initial“ u. „Final State“



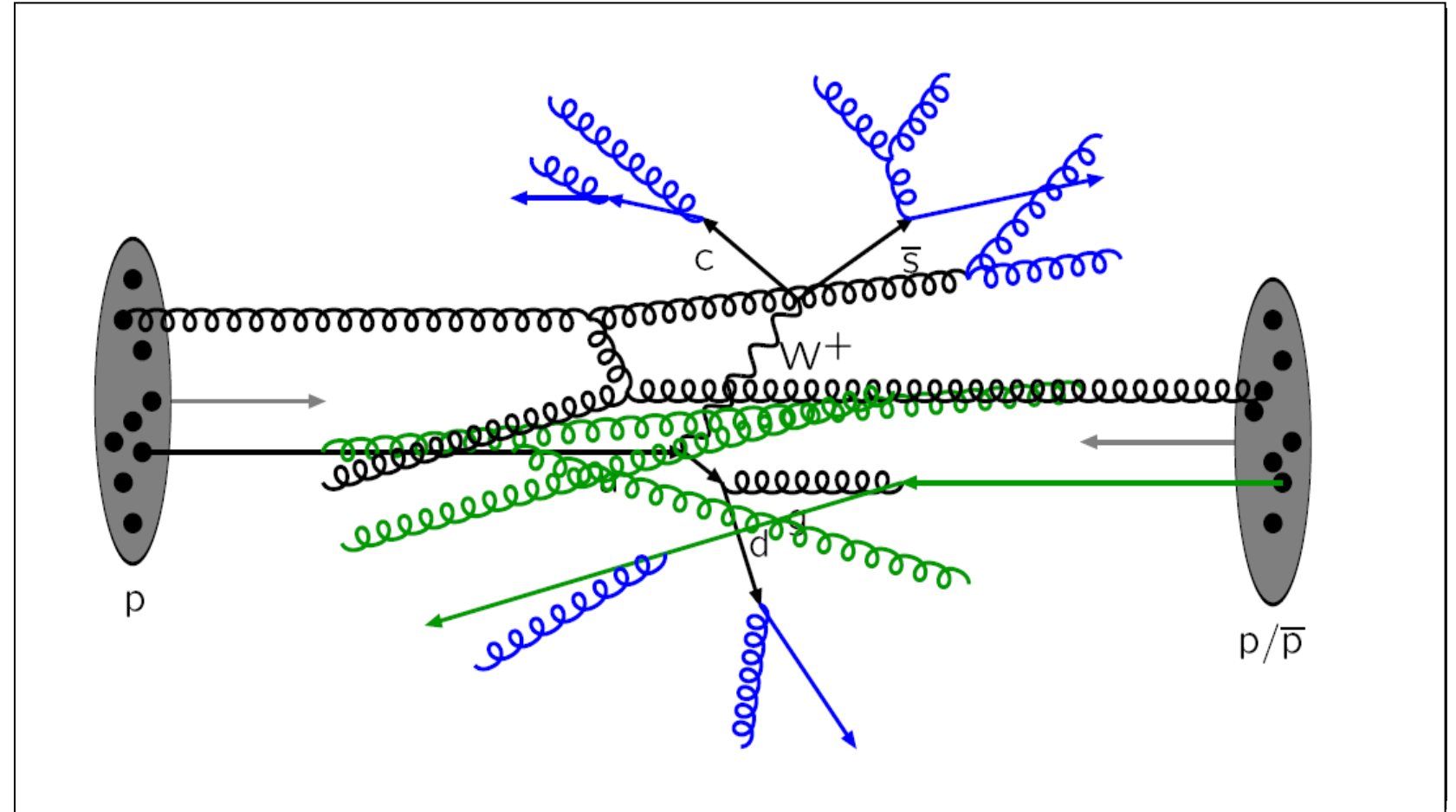
Ein komplettes Ereignis am LHC

„harte“ Kollision

+ ISR, FSR

Abstrahlung von Gluonen
im „Initial“ u. „Final State“

+ „underlying event“ weitere
Wechselwirkung von Partonen
aus selben Protonen

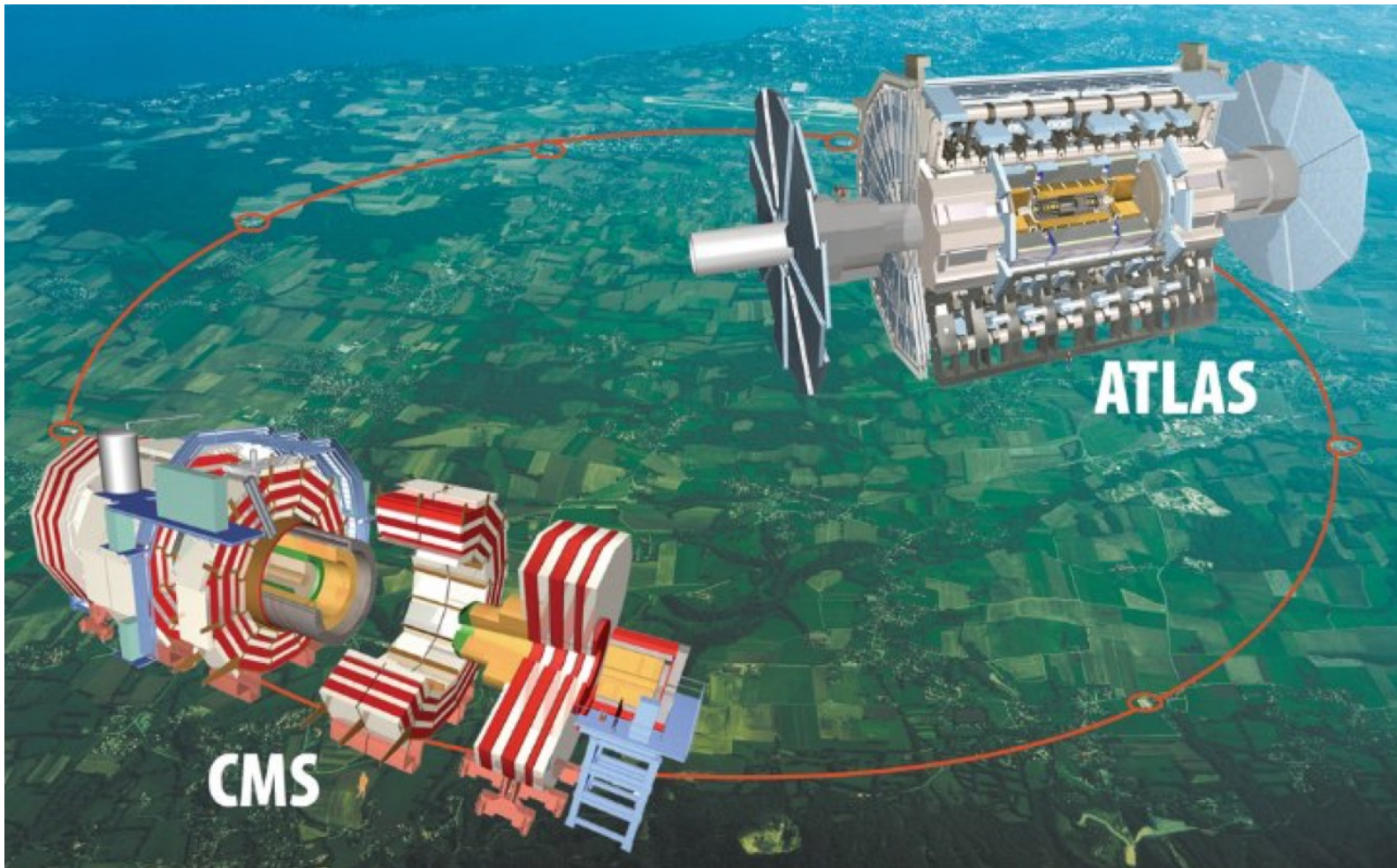


Ein komplettes Ereignis am LHC



- + „Pile Up“: bis 30 überlagerte pp-Wechselwirkung pro Strahldurchdringung in 2012
→ ~1600 geladene Teilchen im Detektor pro „Ereignis“

Die ATLAS- und CMS-Experimente



Design in vielen Aspekten optimiert für Suche nach dem Higgs-Boson

Aufgaben:

Präzise Rekonstruktion von Trajektorien, Impulsen und Energien der produzierten Teilchen bei einer Kollisionsrate von 20(40) MHz

Identifikation von Teilchenspezies (e , μ , γ , τ , b , fehlende Energie)

Rekonstruktion von Zerfallsketten und Bestimmung der Masse des Elternteilchens

Die ATLAS- und CMS-Experimente



Design in vielen Aspekten optimiert für Suche nach dem Higgs-Boson

Aufgaben:

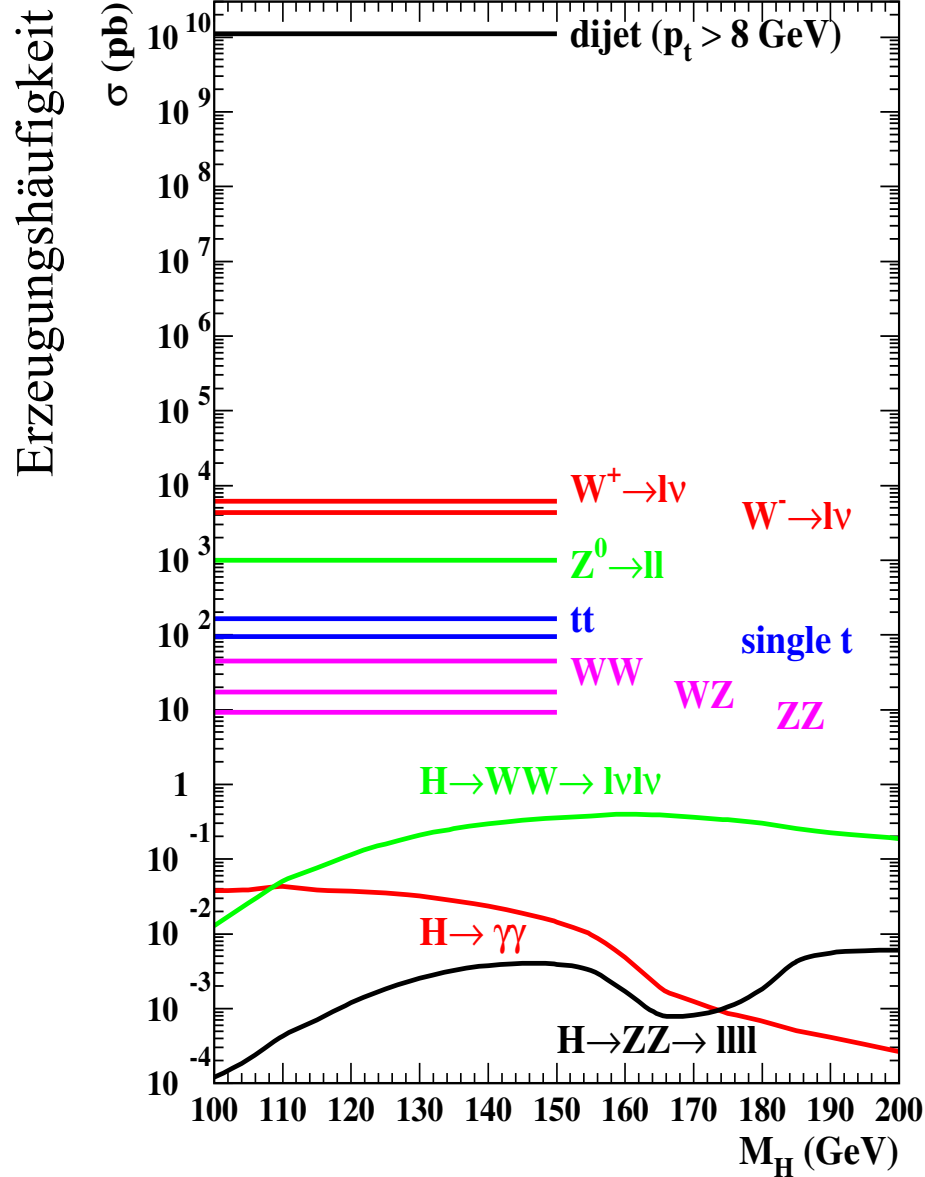
Präzise Rekonstruktion von Trajektorien, Impulsen und Energien der produzierten Teilchen

bei einer Kollisionsrate von 20(40) MHz

Identifikation von Teilchenspezies (e , μ , γ , τ , b , fehlende Energie)

Rekonstruktion von Zerfallsketten und Bestimmung der Masse des Elternteilchens

Die Herausforderung



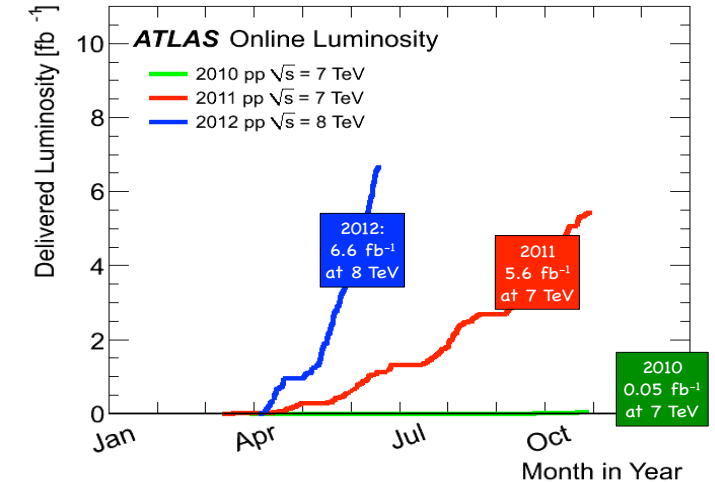
$$N_{\text{Prozess}} = \sigma_{\text{Prozess}} \int L dt$$

σ_{Prozess} = Wirkungsquerschnitt für Prozess durch Natur gegeben
 $\int L dt$ = integrierte Luminosität durch Kollider geliefert

Signal-zu-Untergrundrate: $< 1 : 10^{10}$ bis 10^{13}

Analysierte Daten im Juli 2012
 $\int L dt \sim 10$ bis 11 fb^{-1}

($\sim 50\%$ bei 7 TeV in 2011
 plus $\sim 50\%$ bei 8 TeV in 2012)



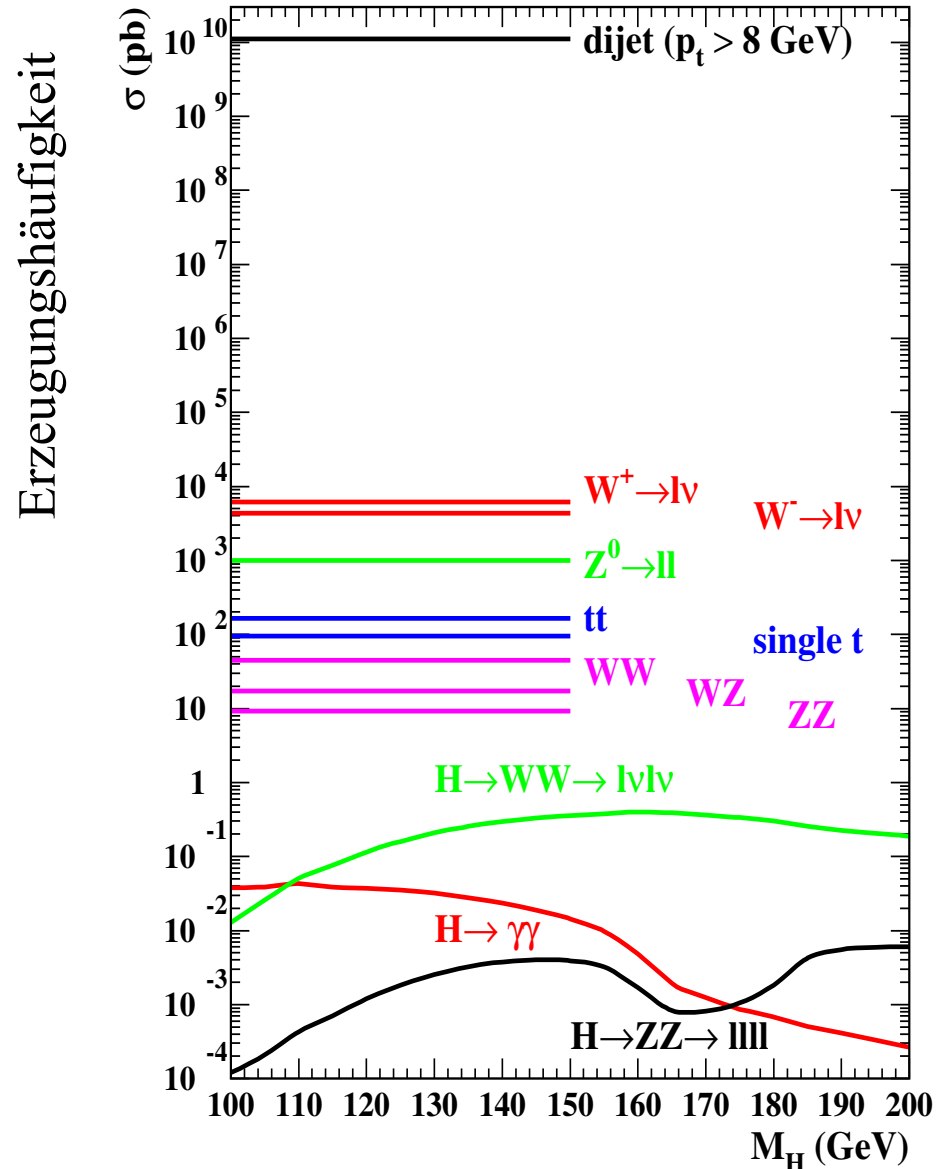
das entspricht:

- $\sim 10^{15}$ Kollisionen
- $\sim 4 \times 10^9$ aufgezeichnet
- $\sim 200\,000$ produzierte Higgs-Teilchen (125 GeV)

aber nur (für $M_H = 125 \text{ GeV}$):

- ~ 480 Zerfälle via $H \rightarrow \gamma\gamma$
- ~ 30 Zerfälle via $H \rightarrow ZZ \rightarrow 4l$
- ~ 4400 Zerfälle via $H \rightarrow WW \rightarrow l\nu l\nu$

Die Herausforderung (2)



alle Kollisionen (20 MHz) → nicht interessant

Datenvolumen: 1 Million Gigabyte/s
Echzeitselektion ($\sim 2,5 \mu s$) durch „Trigger“
ausgelöst durch γ , e , μ , (τ , fehlende Energie)

abspeichern (300 Hz) → evtl interessant (0.0005%)

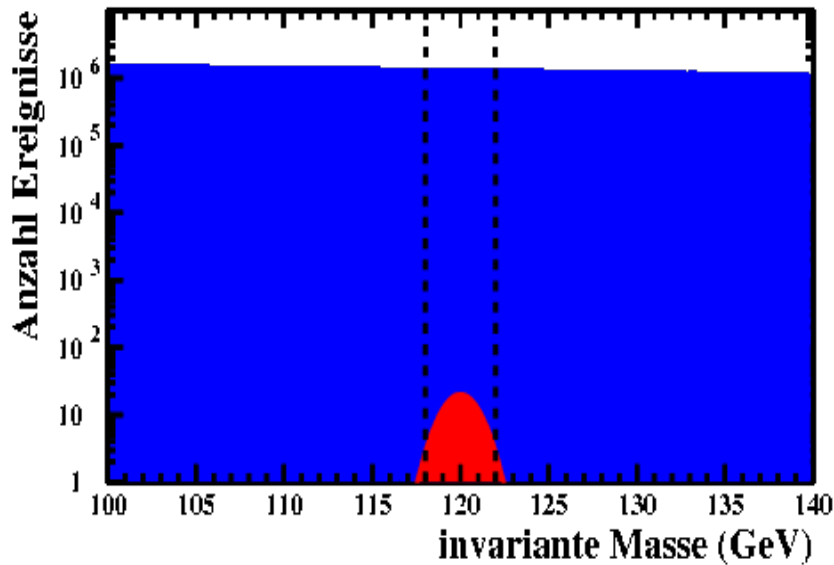
Datenvolumen: 1 Audio-CD/s
 ~ 4000 TeraByte / Jahr in 2011 und 2012
Intelligente Selektion

mögliche Entdeckungen → nur 0.000000001%

Signal-zu-Untergrund-Verhältnis auf Festplatte $< 1:10^6$
Intelligente Selektion meist Aufgabe vom Doktorand*innen,
Master- und Bachelorstudierenden

Wie findet man das Higgs-Teilchen?

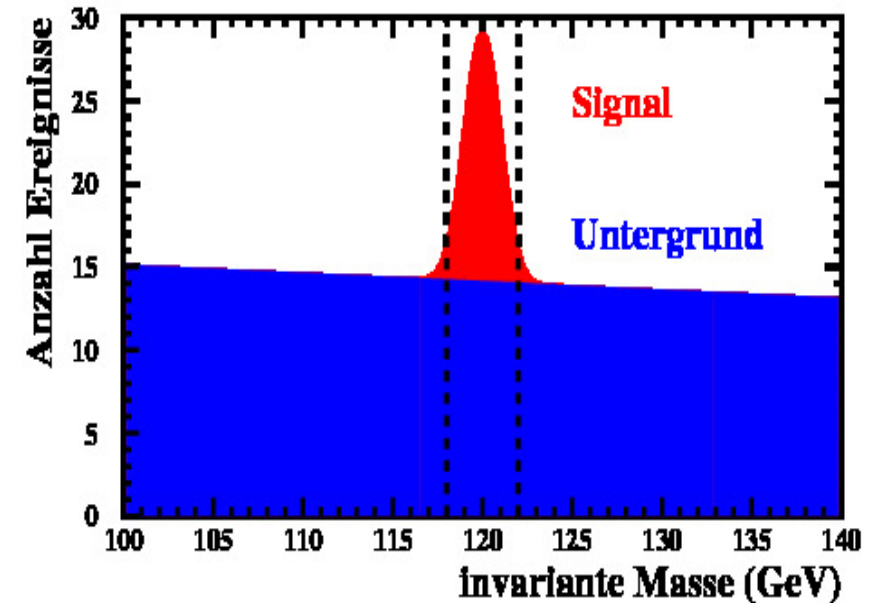
Auf Platte gespeichert vor Selektion:
Signal/Untergrund=1:1 000 000



Signal:
das, was wir suchen

Untergrund: das, was
wir bereits kennen

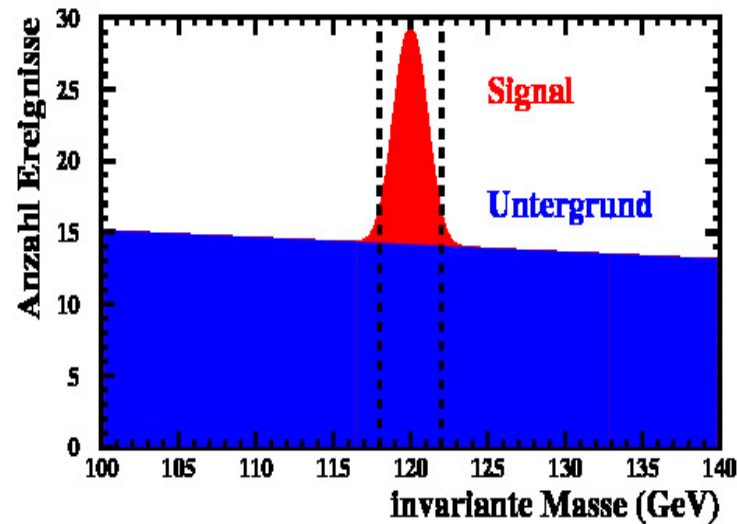
Ziel nach Selektion (hoffentlich):
Signal/Untergrund = 1:1 bis 1:30



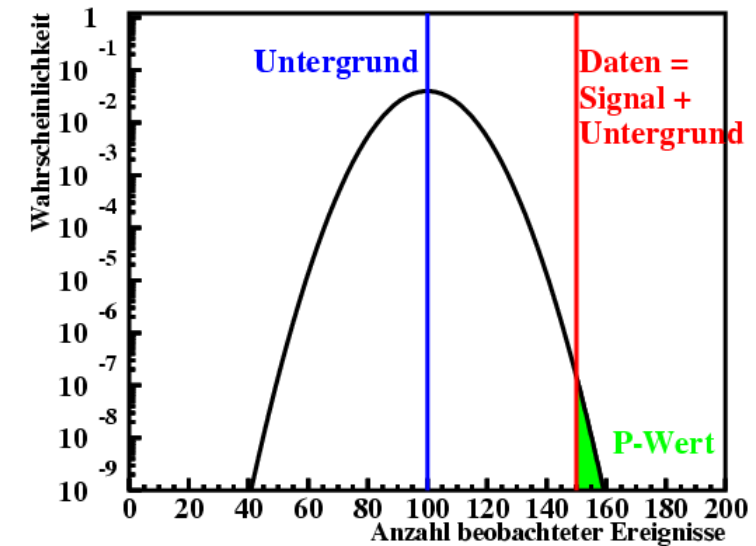
- identifiziere die Zerfallsprodukte des Higgs-Teilchens (z.B. γ , e, μ)
- unterdrücke Untergrund durch weitere Selektionskriterien
- rekonstruiere Zerfall des Higgs-Boson-Kandidaten und seine Masse (falls möglich)
- suche nach lokaler Überhöhung im Massenspektrum (oder anderer Verteilung)

Was bedeutet Entdeckung?

Vergleiche von Beobachtung in Daten mit Erwartung von Untergrund nach vollständiger Selektion
z.B. Anzahl der Ereignisse in finalem Massenfenster



Bestimme Wahrscheinlichkeit so viele Ereignisse wie beobachtet oder mehr im Experiment zu sehen unter Annahme nur Untergrund existiert → P-Wert

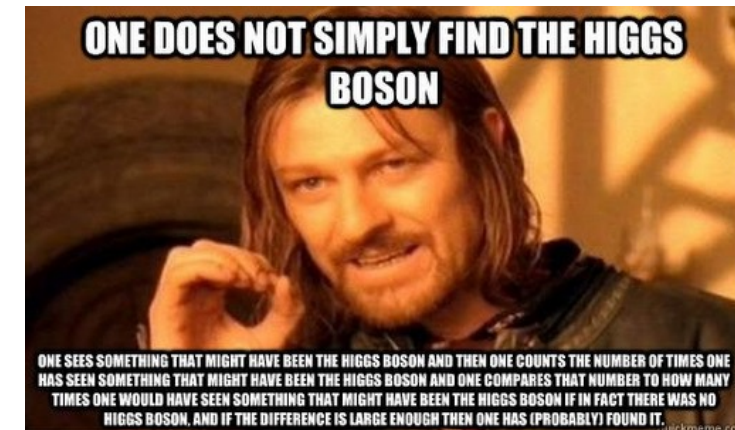


Entdeckung, wenn P-Wert = Wahrscheinlichkeit einer Fluktuation $< 2.85 \times 10^{-7}$

(< 1 zu 3.5 Millionen, ~ 5 „Richtige“ + Zufallszahl, Signifikanz Z von 5-Sigma)

Für Gaussverteilung: Signifikanz $Z = \text{Signal} / \sqrt{\text{Untergrund}}$

Bsp: 100 Untergrund, Daten 150 → Signal = 50 → $Z = 5$



Unterdrückung der Untergrundprozesse durch Ereigniselektion

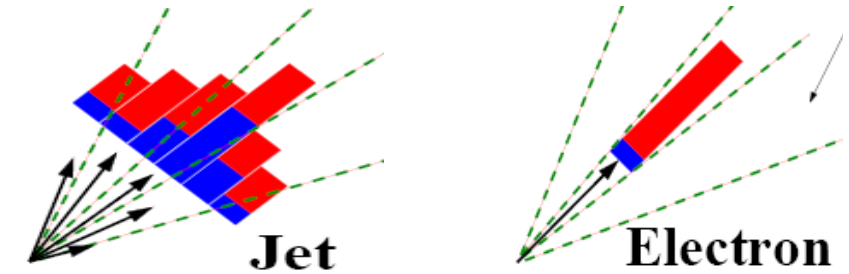
Zwei Arten von Untergrundprozessen:

➤ **reduzierbarer Untergrund:**

andere Teilchen im Endzustand die falsch identifiziert werden
z.B. Jets aus Quark oder Gluon als Elektron oder Photon

→ exzellente Unterscheidung von „Physikobjekten“

Unterdrückung von Fehlerkennung „Rejection factor“ typisch $O(1000)$ - $O(10000)$



➤ **irreduzierbarer Untergrund:**

selbe Teilchen im Endzustand, aber andere Topologie/Kinematik

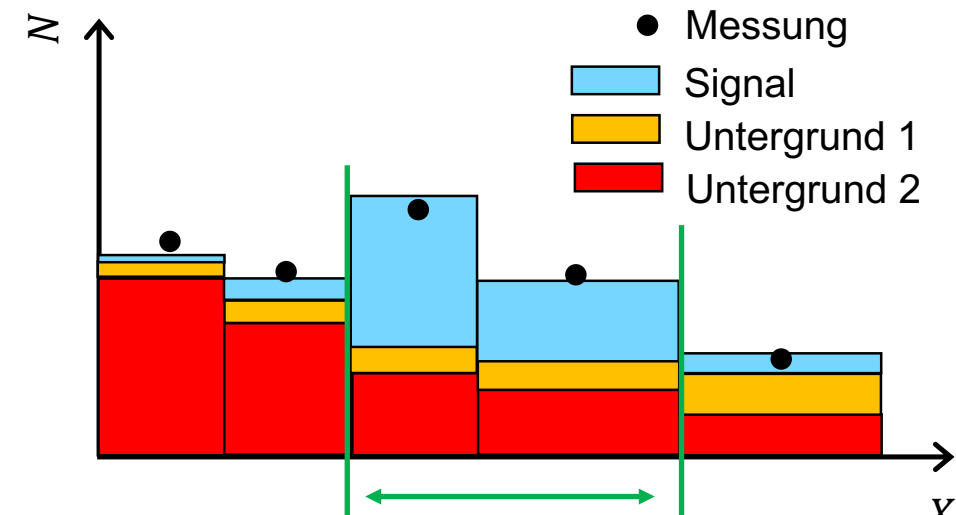
→ Sequenz von Auswahlkriterien („Schnitten“) auf
Observablen mit Separationskraft

z.B.: rekonstruierte Masse des Higgs-Boson-Kandidaten

Vorhersage für Optimierung der Schnittkriterien aus Simulation
von Ereignissen für verschiedene Prozesse.

Selektiere Bins/Intervalle in Verteilung mit hohem
Signal-zu-Untergrund-Verhältnis (hier Bins 3 und 4.)

Histogramm einer gemessenen
Observablen X



Welche Kombination von Produktion und Zerfall?

- keine rein hadronischen Endzustände, nicht $gg \rightarrow H$ mit $H \rightarrow bb, \rightarrow ZZ(WW) \rightarrow 4 \text{ Quarks} \rightarrow$ kein Trigger

	Gluon-Fusion	VBF	WH/ZH	ttH
$H \rightarrow \gamma\gamma$				
$H \rightarrow ZZ \rightarrow 4 l$				
$H \rightarrow WW \rightarrow 2l2\nu$				
$H \rightarrow \tau\tau$				
$H \rightarrow bb$				

Welche Kombination von Produktion und Zerfall?

- keine rein hadronischen Endzustände, nicht $gg \rightarrow H$ mit $H \rightarrow bb, \rightarrow ZZ(WW) \rightarrow 4 \text{ Quarks} \rightarrow$ kein Trigger

	Gluon-Fusion	VBF	WH/ZH	ttH
$H \rightarrow \gamma\gamma$				
$H \rightarrow ZZ \rightarrow 4 l$				
$H \rightarrow WW \rightarrow 2l2\nu$				
$H \rightarrow \tau\tau$				
$H \rightarrow bb$				

- **ausreichende Produktionsrate?**
 $\sigma_{\text{prod}} \times \text{Verzweigungsverhältnis}$

Welche Kombination von Produktion und Zerfall?

- keine rein hadronischen Endzustände, nicht $gg \rightarrow H$ mit $H \rightarrow bb, \rightarrow ZZ(WW) \rightarrow 4 \text{ Quarks} \rightarrow$ kein Trigger

	Gluon-Fusion	VBF	WH/ZH	ttH
$H \rightarrow \gamma\gamma$				
$H \rightarrow ZZ \rightarrow 4 l$				
$H \rightarrow WW \rightarrow 2l2\nu$				
$H \rightarrow \tau\tau$				
$H \rightarrow bb$				

- **ausreichende Produktionsrate?**
 $\sigma_{\text{prod}} \times \text{Verzweigungsverhältnis}$
- **effizienter Trigger?**
 Elektronen, Myonen, Photonen, ...

Welche Kombination von Produktion und Zerfall?

- keine rein hadronischen Endzustände, nicht $gg \rightarrow H$ mit $H \rightarrow bb, \rightarrow ZZ(WW) \rightarrow 4 \text{ Quarks} \rightarrow$ kein Trigger

	Gluon-Fusion	VBF	WH/ZH	ttH
$H \rightarrow \gamma\gamma$				
$H \rightarrow ZZ \rightarrow 4 l$				
$H \rightarrow WW \rightarrow 2l2\nu$				
$H \rightarrow \tau\tau$				
$H \rightarrow bb$				

- **ausreichende Produktionsrate?**
 $\sigma_{\text{prod}} \times \text{Verzweigungsverhältnis}$
- **effizienter Trigger?**
Elektronen, Myonen, Photonen, ...
- **Untergrund unterdrückbar?**
Masse gut rekonstruierbar,
gutes Signal-zu-Untergrundverhältnis

Welche Kombination von Produktion und Zerfall?

- keine rein hadronischen Endzustände, nicht $gg \rightarrow H$ mit $H \rightarrow bb, \rightarrow ZZ(WW) \rightarrow 4$ Quarks \rightarrow kein Trigger

	Gluon-Fusion	VBF	WH/ZH	ttH
$H \rightarrow \gamma\gamma$	Green	Green	Orange	Orange
$H \rightarrow ZZ \rightarrow 4 l$	Green	Orange	Orange	Orange
$H \rightarrow WW \rightarrow 2l2\nu$	Green	Green	Orange	Orange
$H \rightarrow \tau\tau$	Purple	Purple	Orange	Orange
$H \rightarrow bb$	Red	Red	Purple	Purple

- **ausreichende Produktionsrate?**
 $\sigma_{\text{prod}} \times \text{Verzweigungsverhältnis}$
- **effizienter Trigger?**
Elektronen, Myonen, Photonen, ...
- **Untergrund unterdrückbar?**
Masse gut rekonstruierbar,
gutes Signal-zu-Untergrundverhältnis

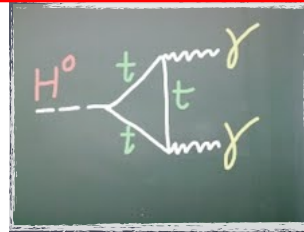
\rightarrow Entdeckungskanäle am LHC: $H \rightarrow \gamma\gamma$, $ZZ \rightarrow 4l$, $WW \rightarrow l\nu l\nu$ produziert in Gluon-Fusion und VBF

kleiner Beitrag von $H \rightarrow \tau\tau$ aus VBF und $H \rightarrow bb$ aus Higgs-Strahlung (WH/ZH)

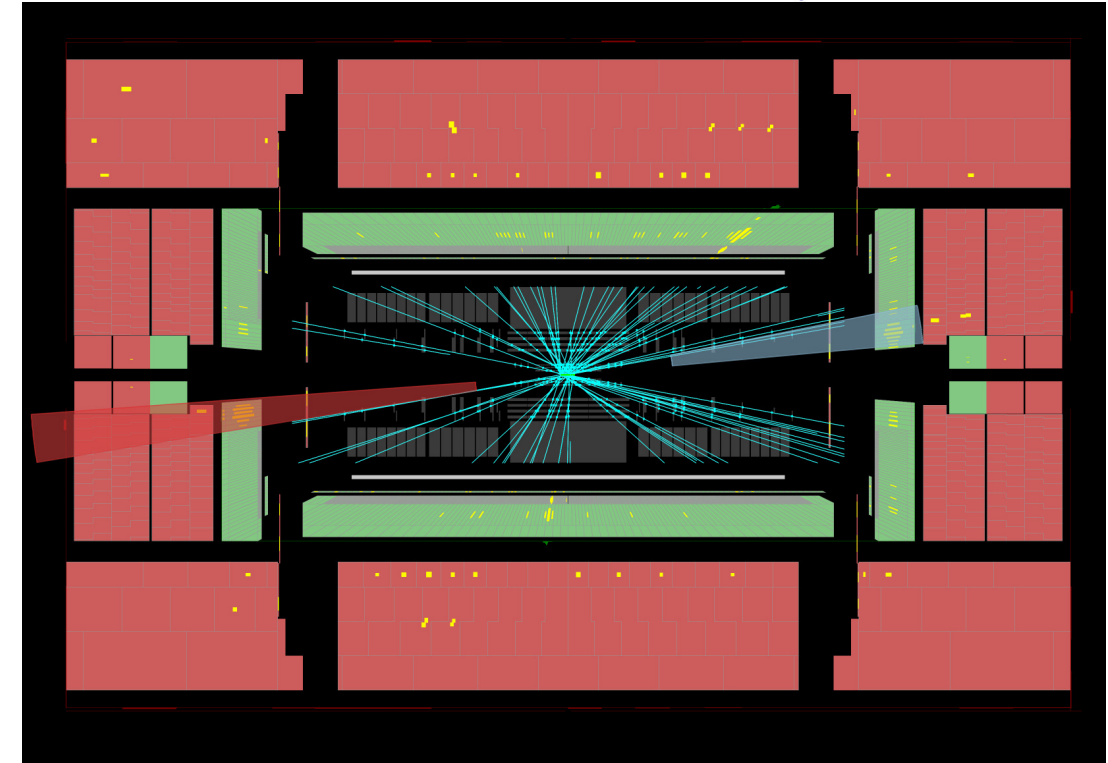
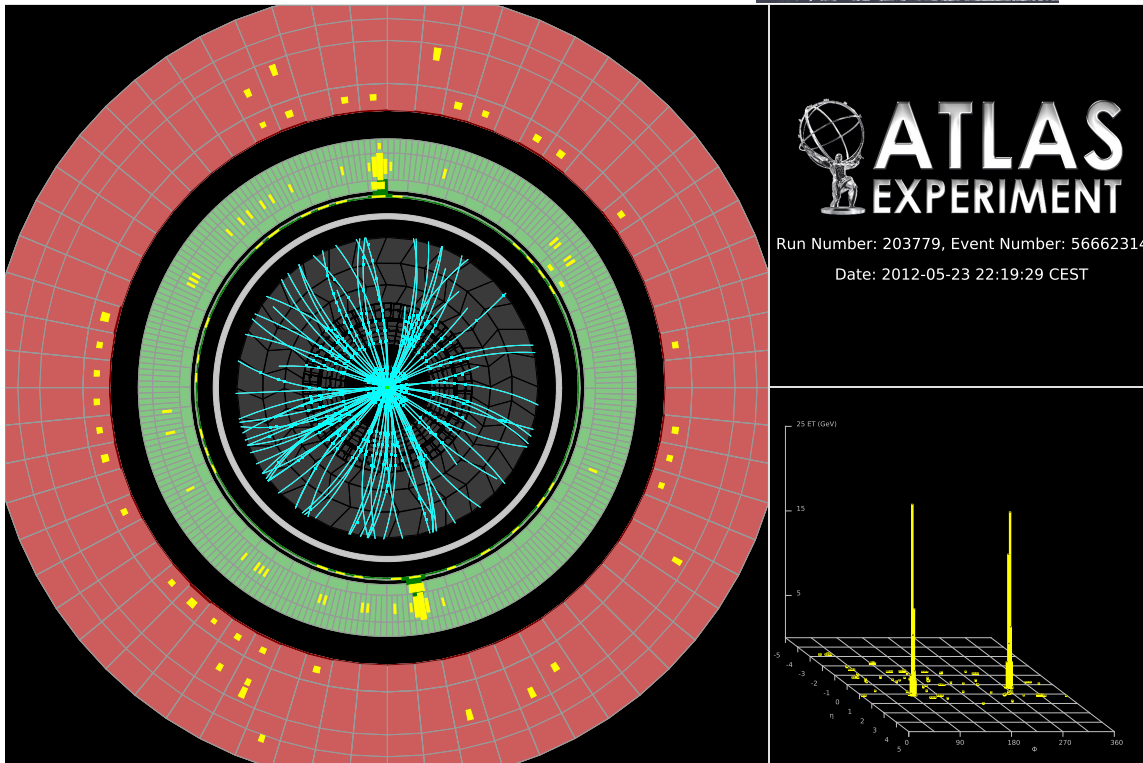
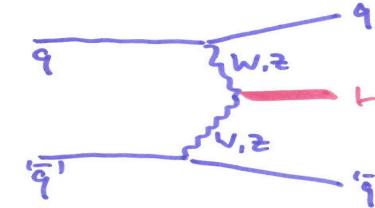
$H \rightarrow bb$ nur in W(Z)H-Produktion mit $W \rightarrow l\nu$ oder $Z \rightarrow ll$, brauchen Lepton für Trigger

$H \rightarrow \tau\tau$ nur in VBF, sonst Masse des Di-Tau-Paares nicht rekonstruierbar

H \rightarrow 2 Photonen

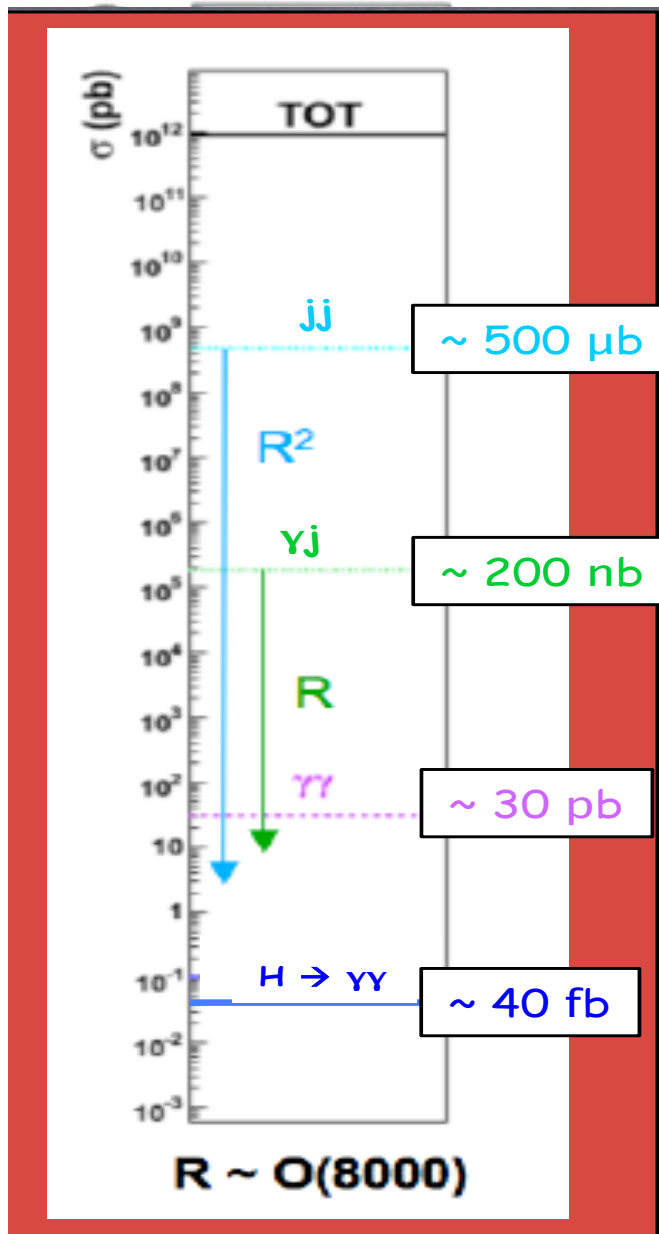


~480 Zerfälle
im Datensatz

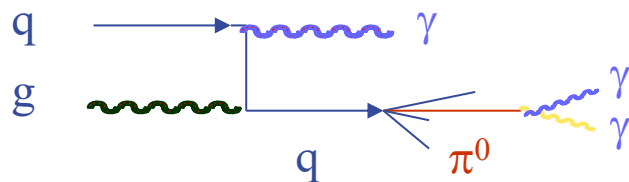


- Herausforderung:
- Identifizierung von Photonen mit hoher Reinheit
 - Präzise Rekonstruktion der Richtungen und Energien der beiden Photonen
 - Verbesserung der Sensitivität durch verschiedene Ereigniskategorien

H → 2 Photonen: Untergrundunterdrückung

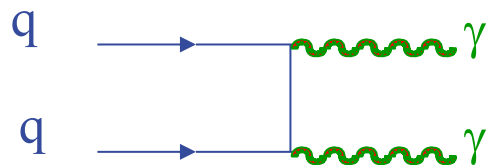


reduzierbarer Untergrund: γ -jet , jet-jet
(5×10^6 bzw. $10^9 \times$ Signal)

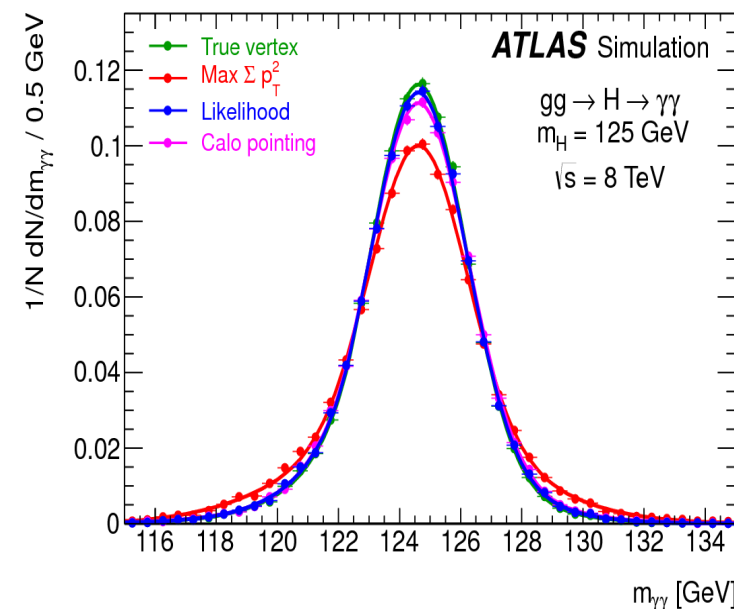
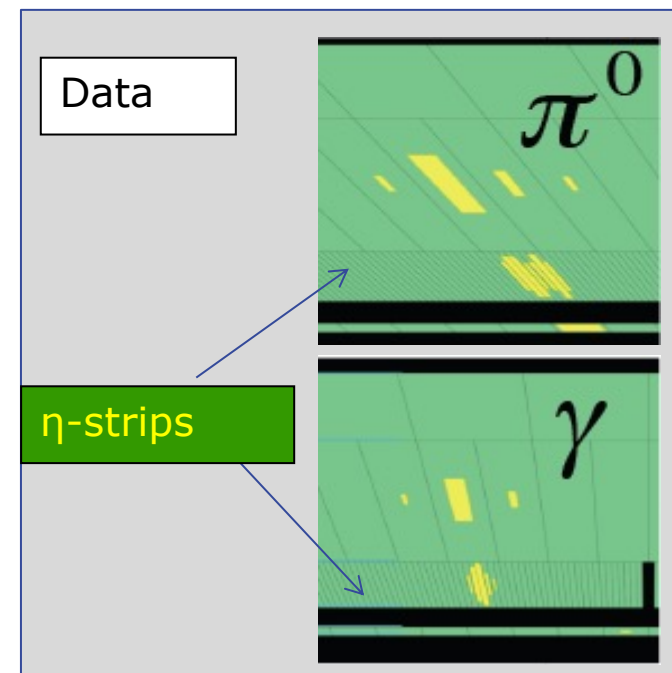


unterscheide γ und Jet (π^0)

irreduzierbarer Untergrund:
(750 x Signal)

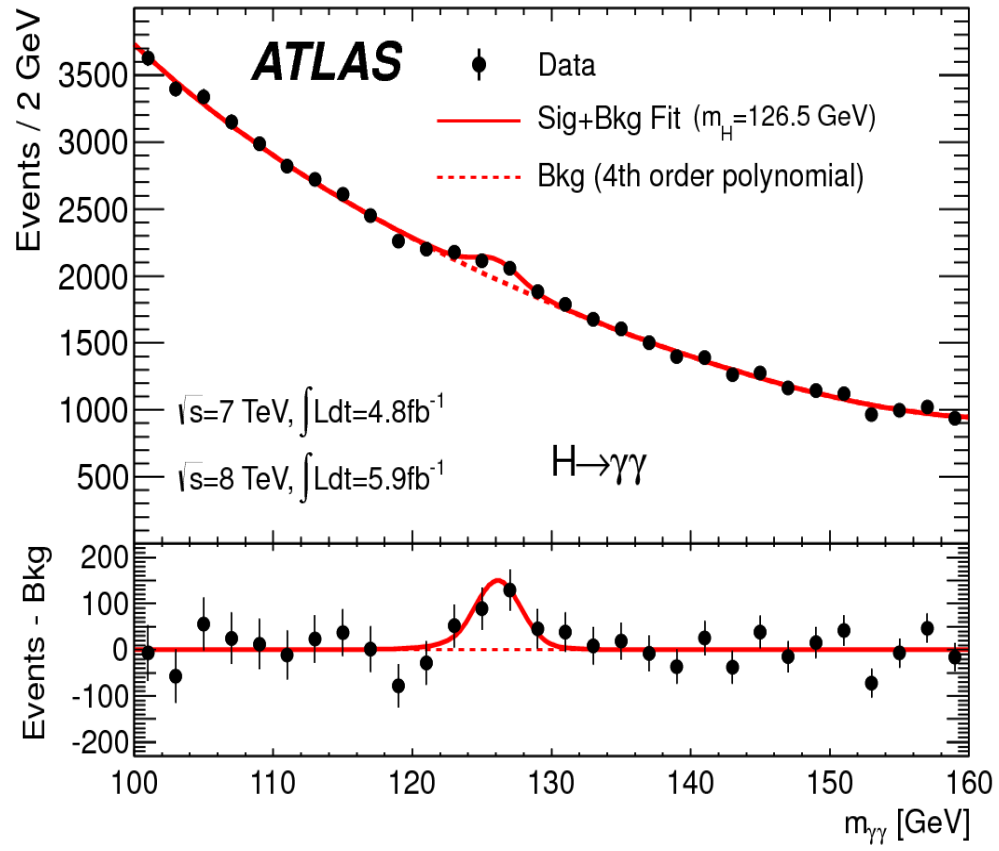


exzellente Rekonstruktion
der Diphotonmasse $M_{\gamma\gamma}$

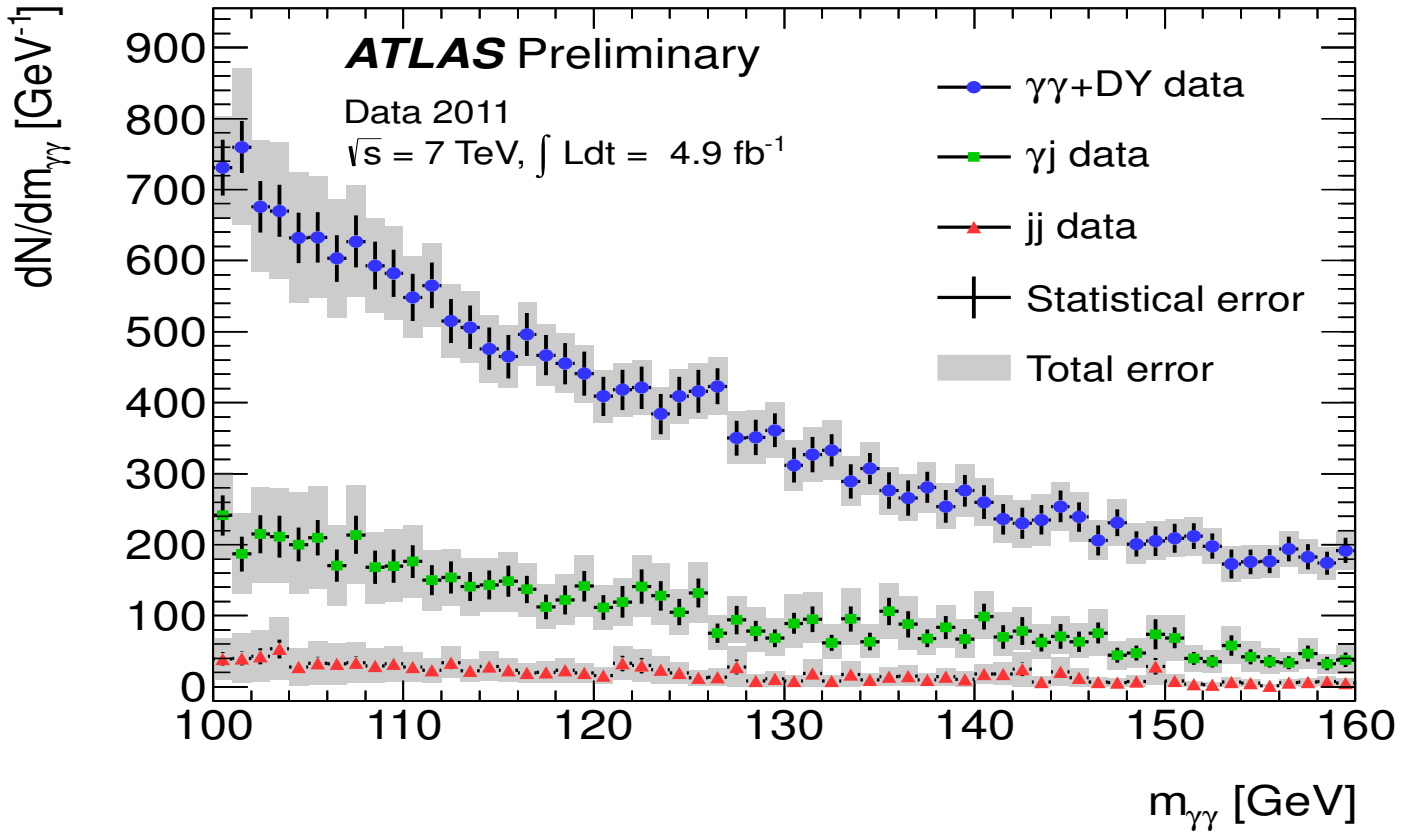


ATLAS: Di-Photon-Massenspektrum

inklusive Spektrum
 Signal/Untergrund = 1/36

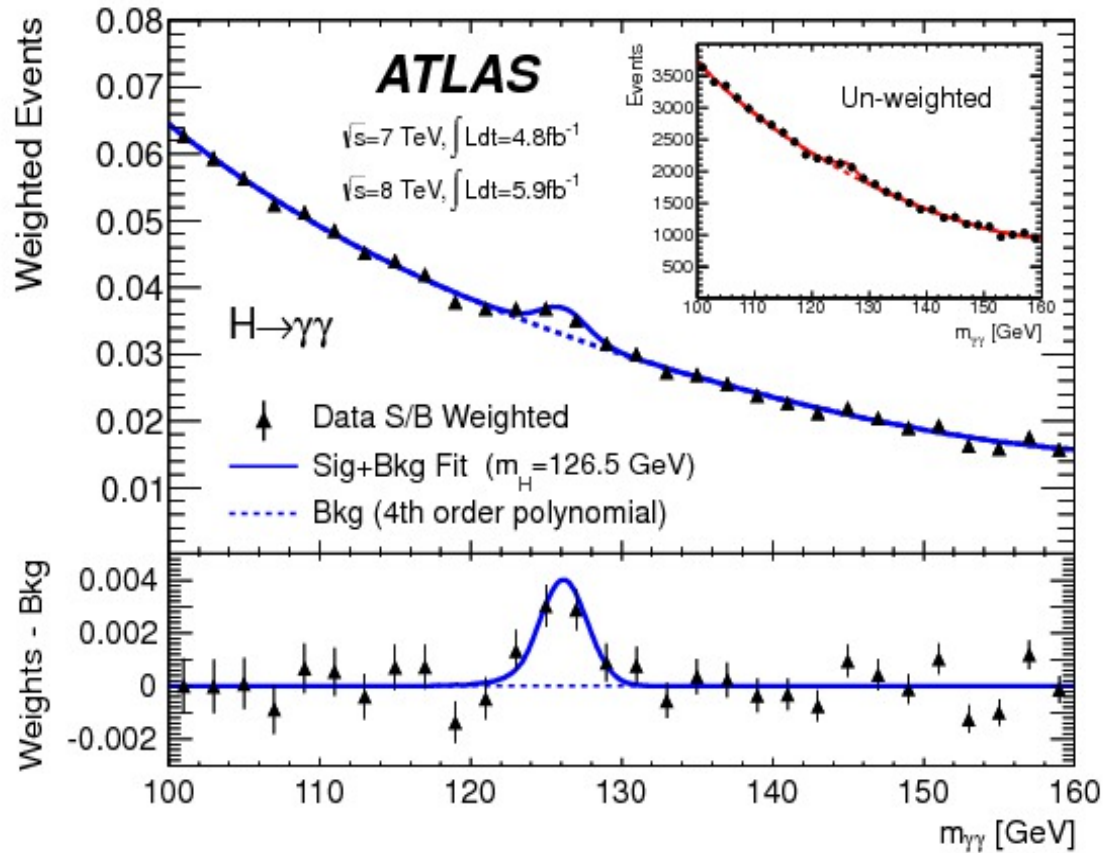


Ziel erreicht: irreduzibler Untergrund dominiert
 (hier nur 2011 Daten gezeigt)

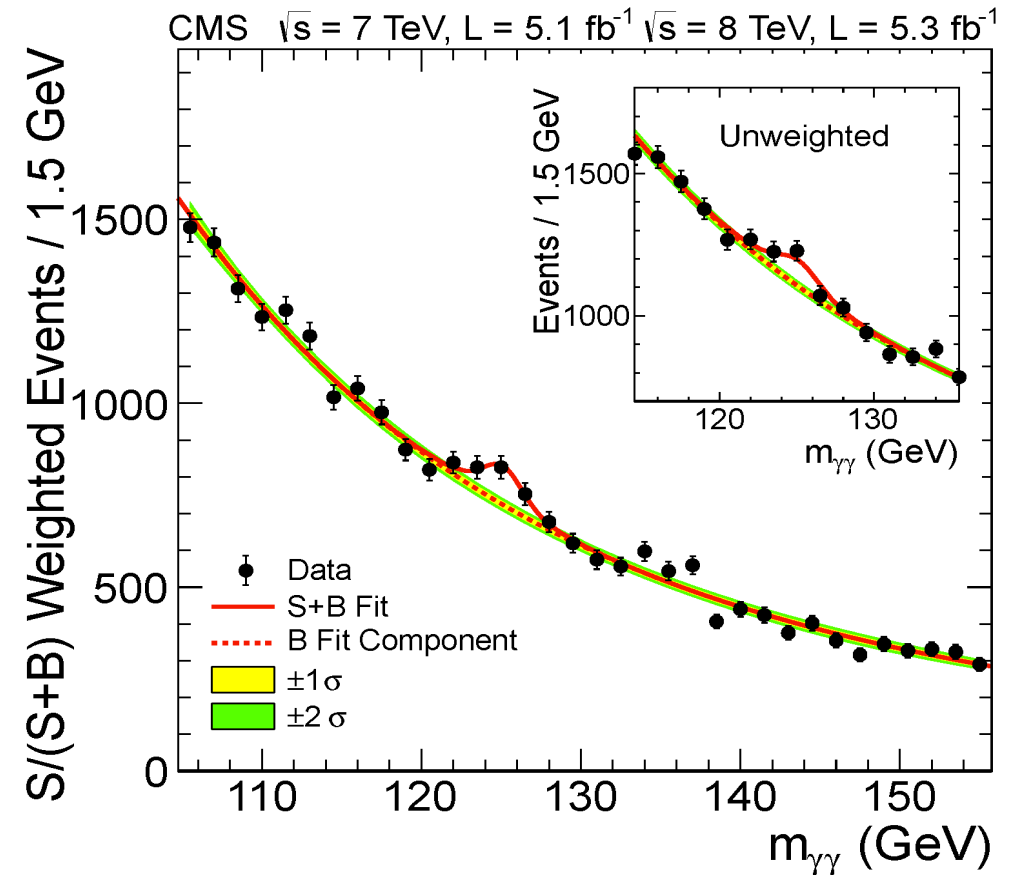


Aufspaltung in verschiedene Ereigniskategorien z.B. für VBF-Produktion → Signal/Untergrund = 1/4.5
 Gewichte verschiedenen Kategorien mit “optimalen” Gewicht = $\ln(1 + \text{Signal/Untergrund})$

Gewichtete Di-Photon-Massenspektren in ATLAS und CMS



Signifikanter Überschuss bei 126.5 GeV
 Signalstärke $\mu = \sigma_{\text{beo}}/\sigma_{\text{SM}} = 1.8 \pm 0.5$
 Signifikanz: $Z = 4.5$ (2.5 erw.)



Signifikanter Überschuss bei 125 GeV
 Signalstärke $\mu = \sigma_{\text{beo}}/\sigma_{\text{SM}} = 1.6 \pm 0.5$
 Signifikanz: $Z = 4.1$ (2.8 erw.)

$H \rightarrow ZZ^{(*)} \rightarrow 4 \text{ Leptonen}$

Signatur: 4 isolierte Leptonen (eeee, ee $\mu\mu$, $\mu\mu\mu\mu$), 2 konsistent mit Zerfall $Z \rightarrow 2 l$

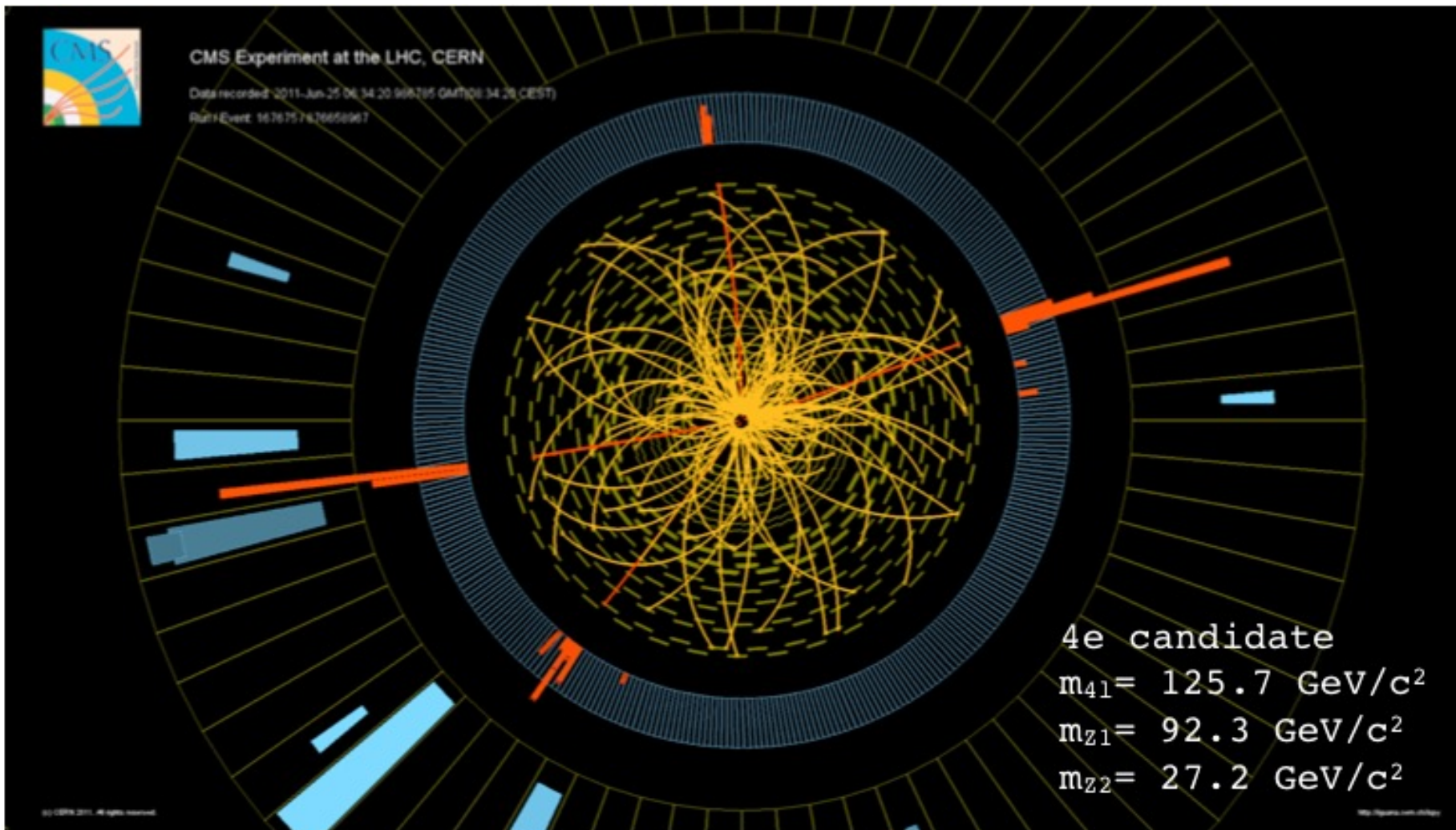
~30 Zerfälle
via $H \rightarrow ZZ \rightarrow 4l$



Herausforderung:

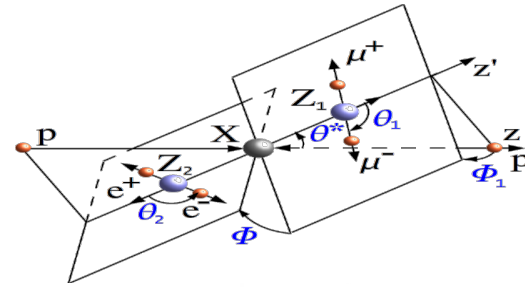
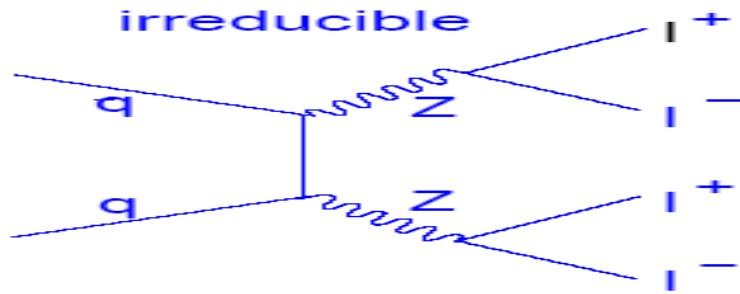
Leptonrekonstruktion
und -identifikation

Rekonstruktion von M_{4l}



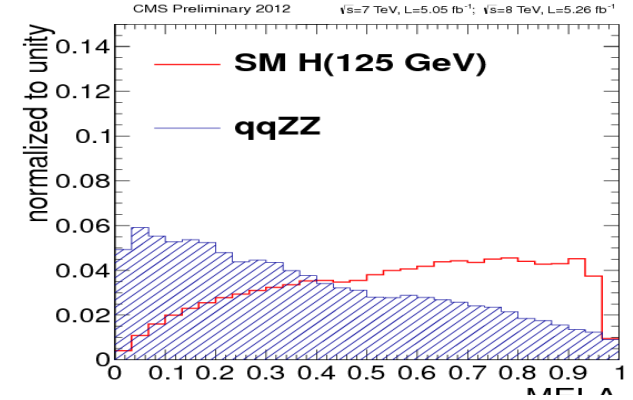
H → ZZ(*) → 4l: Untergrundunterdrückung

- irreduzibel = der selbe Endzustand: ZZ → 4 Leptonen (~10xSignal)



exzellente Rekonstruktion der invarianten Vierleptonmasse

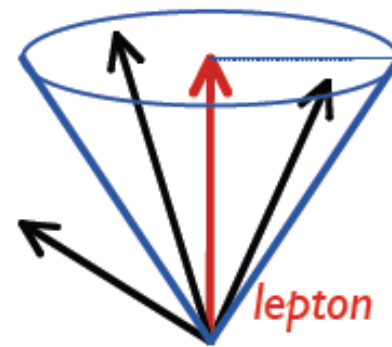
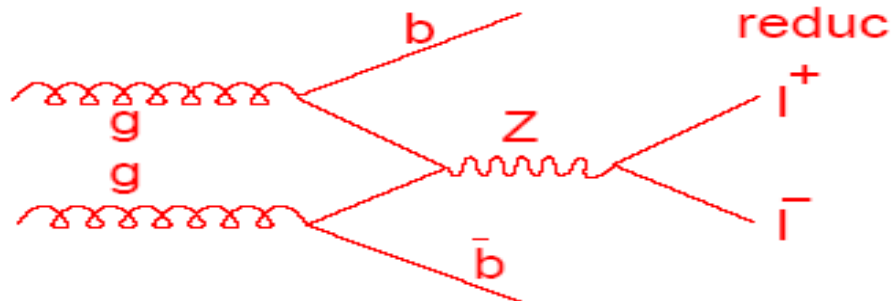
Nutze unterschiedliche Winkelkorrelationen



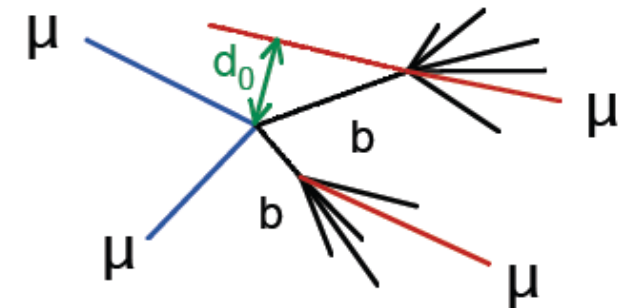
$$K_D = \mathcal{P}_{\text{sig}} / (\mathcal{P}_{\text{sig}} + \mathcal{P}_{\text{bkg}})$$

Wkt. für Signal aus Winkeln

- reduzibel = ein anderer Endzustand, Fehlidentifikation von Physikobjekten:
z.B. Zbb (~60xSignal): 2 Leptonen aus B-Zerfällen → Unterscheide Leptonen aus Z-Zerfall und B → lX Zerfall

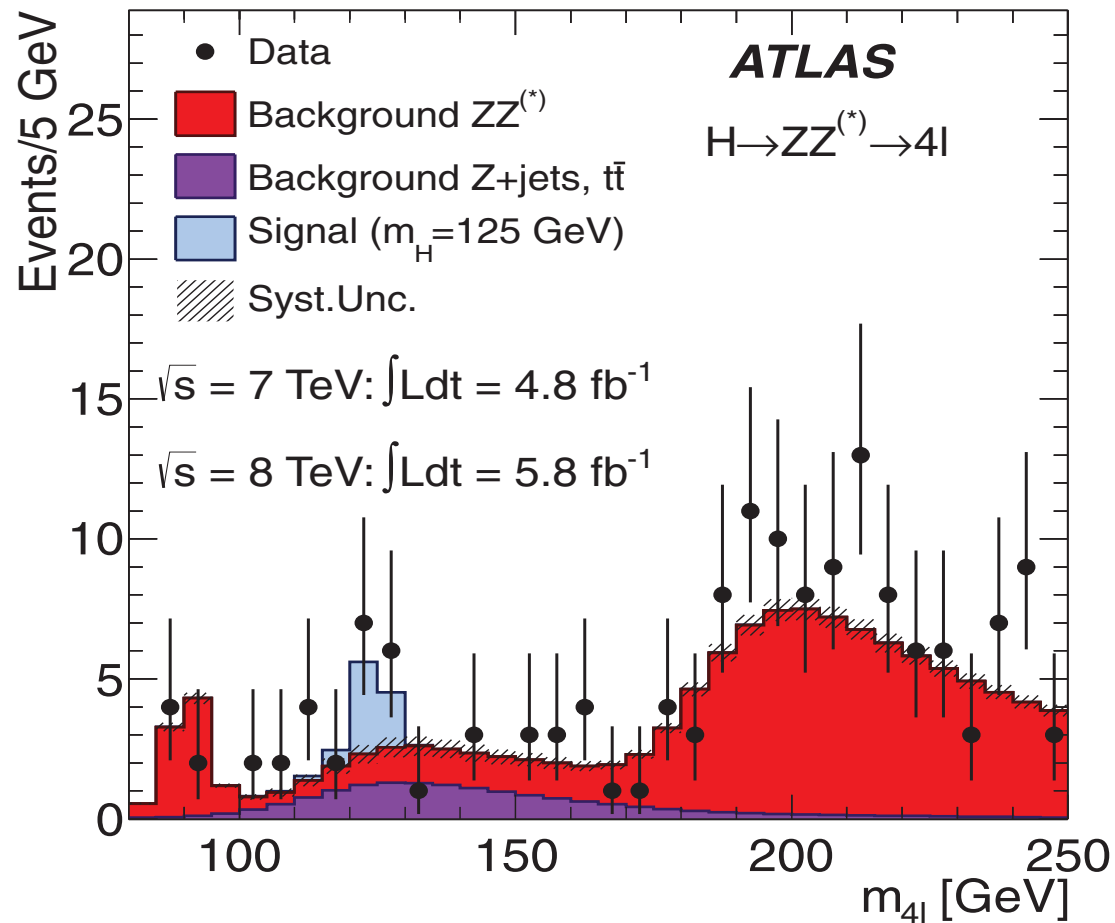


nicht isoliert von anderen Objekten

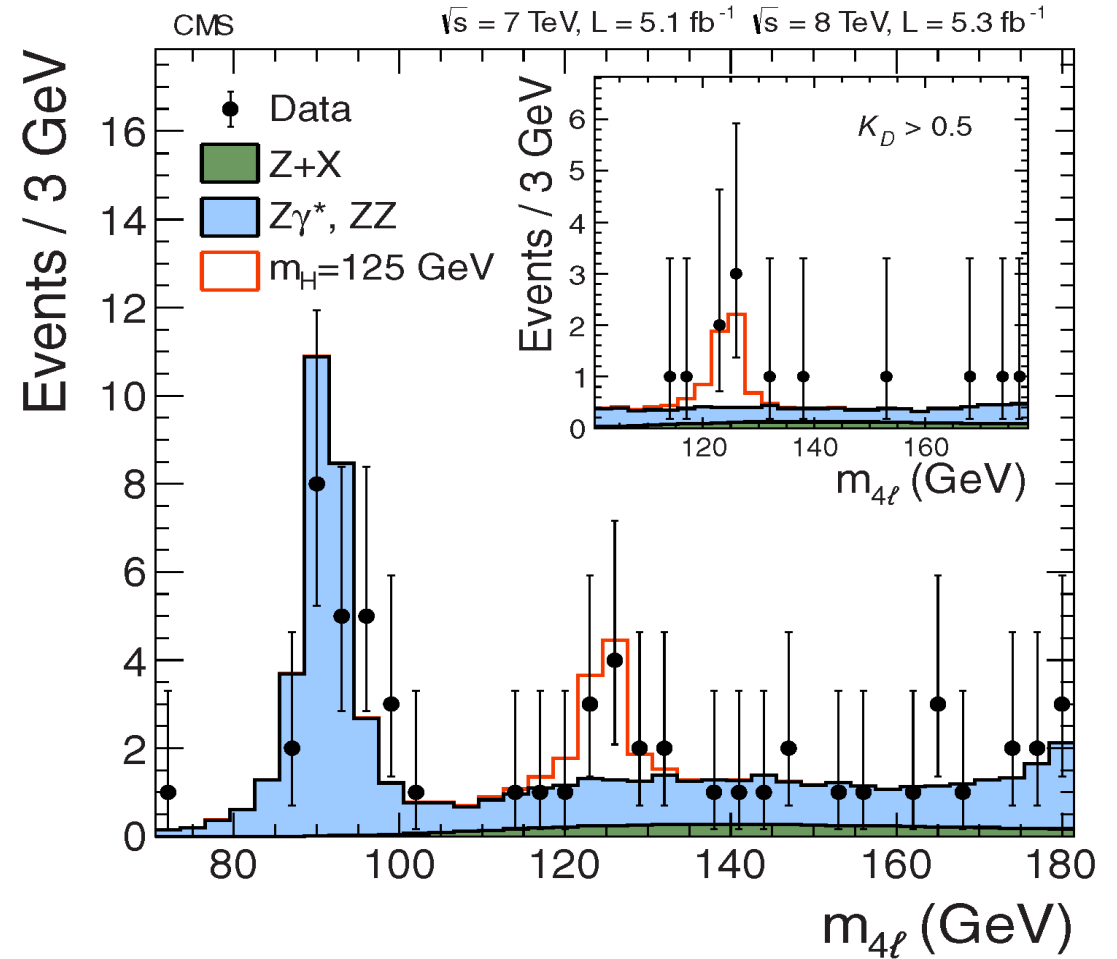


Spur zeigt nicht zum Kollisionsvertex

H → ZZ(*) → 4 Leptonen-Massenspektren in ATLAS und CMS



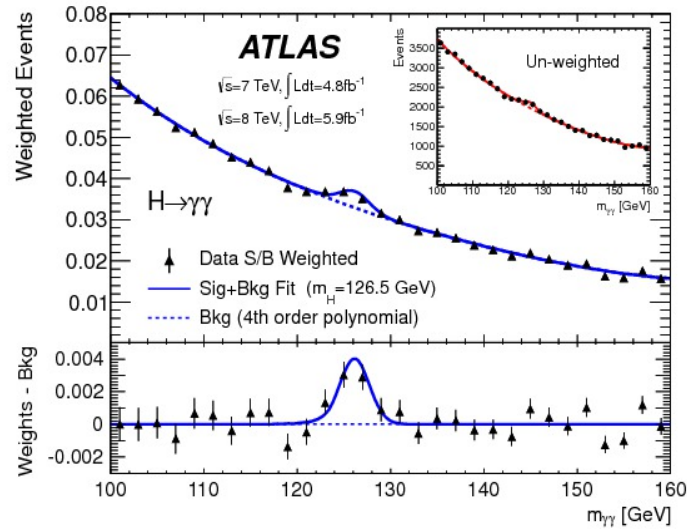
Signal-zu-Untergrund: 1:1
 Signifikanter Überschuss bei 125 GeV
 Signalstärke $\mu = \sigma_{\text{beo}}/\sigma_{\text{SM}} = 1.4 \pm 0.6$
 Signifikanz: $Z = 3.4$ (2.7 erw.)



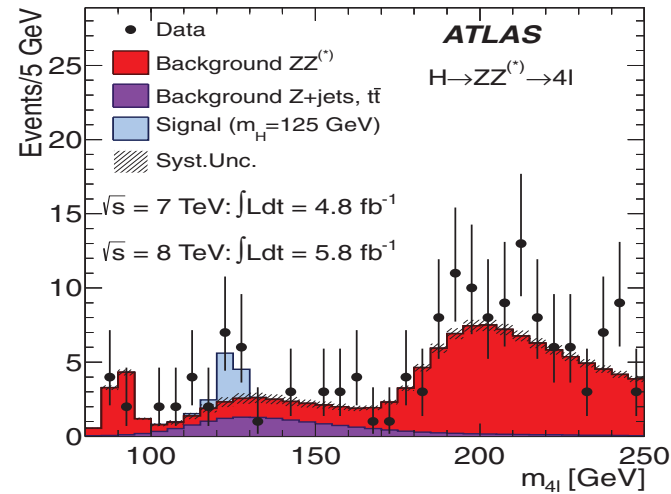
Signal-zu-Untergrund: 2:1
 Signifikanter Überschuss bei 125.6 GeV
 Signalstärke $\mu = \sigma_{\text{beo}}/\sigma_{\text{SM}} = 0.70 \pm 0.35$
 Signifikanz: $Z = 3.2$ (3.8 erw.)

Signifikante Überschüsse beobachtet in 3 bosonischen Zerfällen

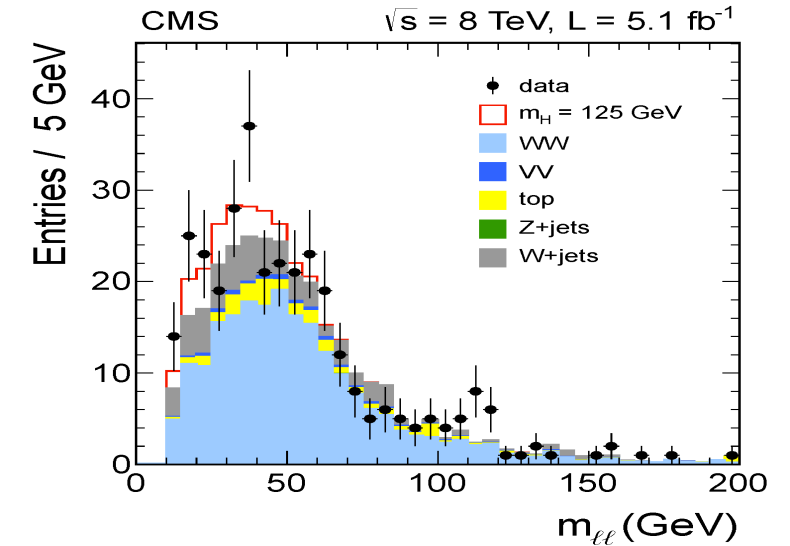
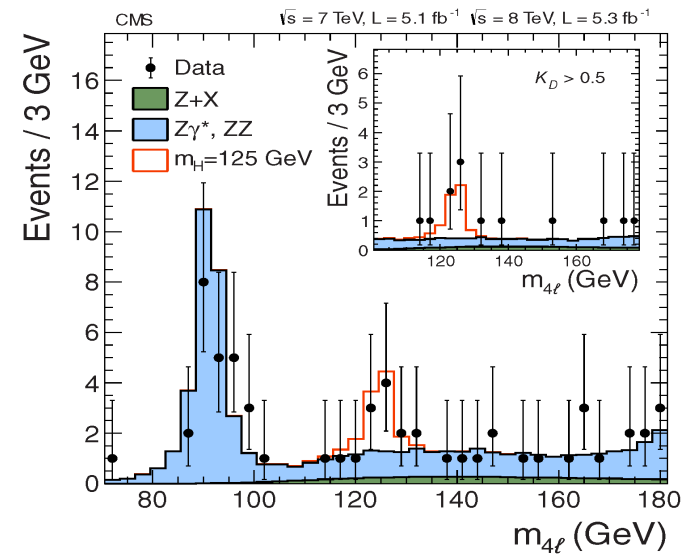
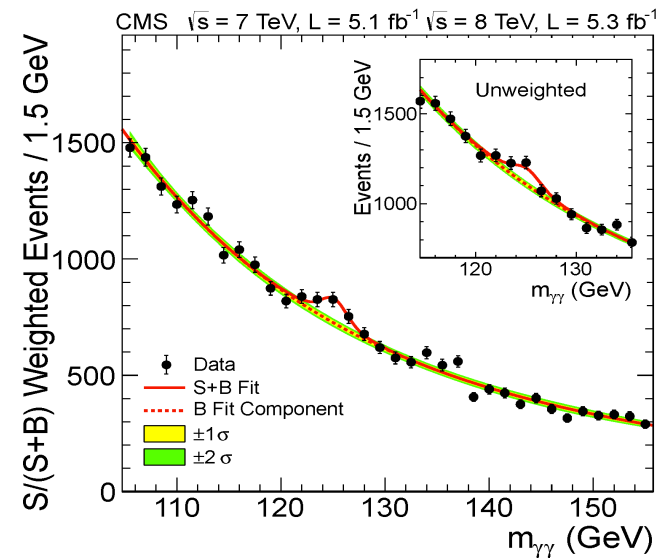
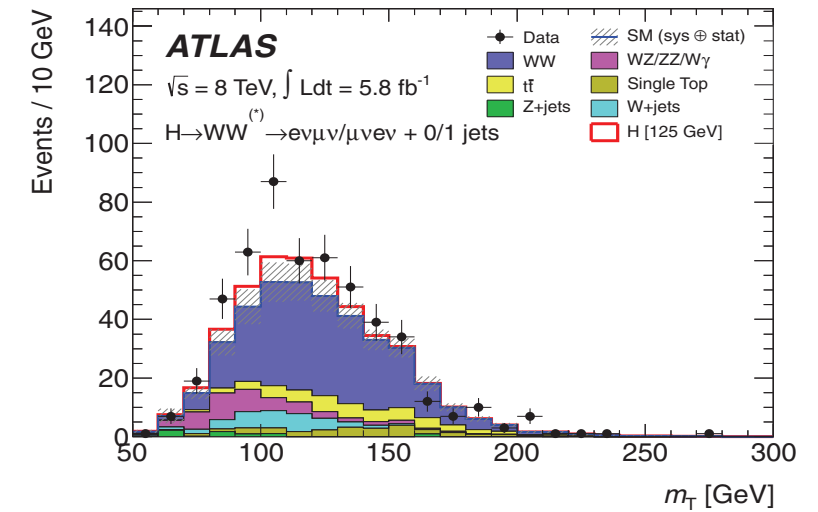
$H \rightarrow \gamma\gamma$



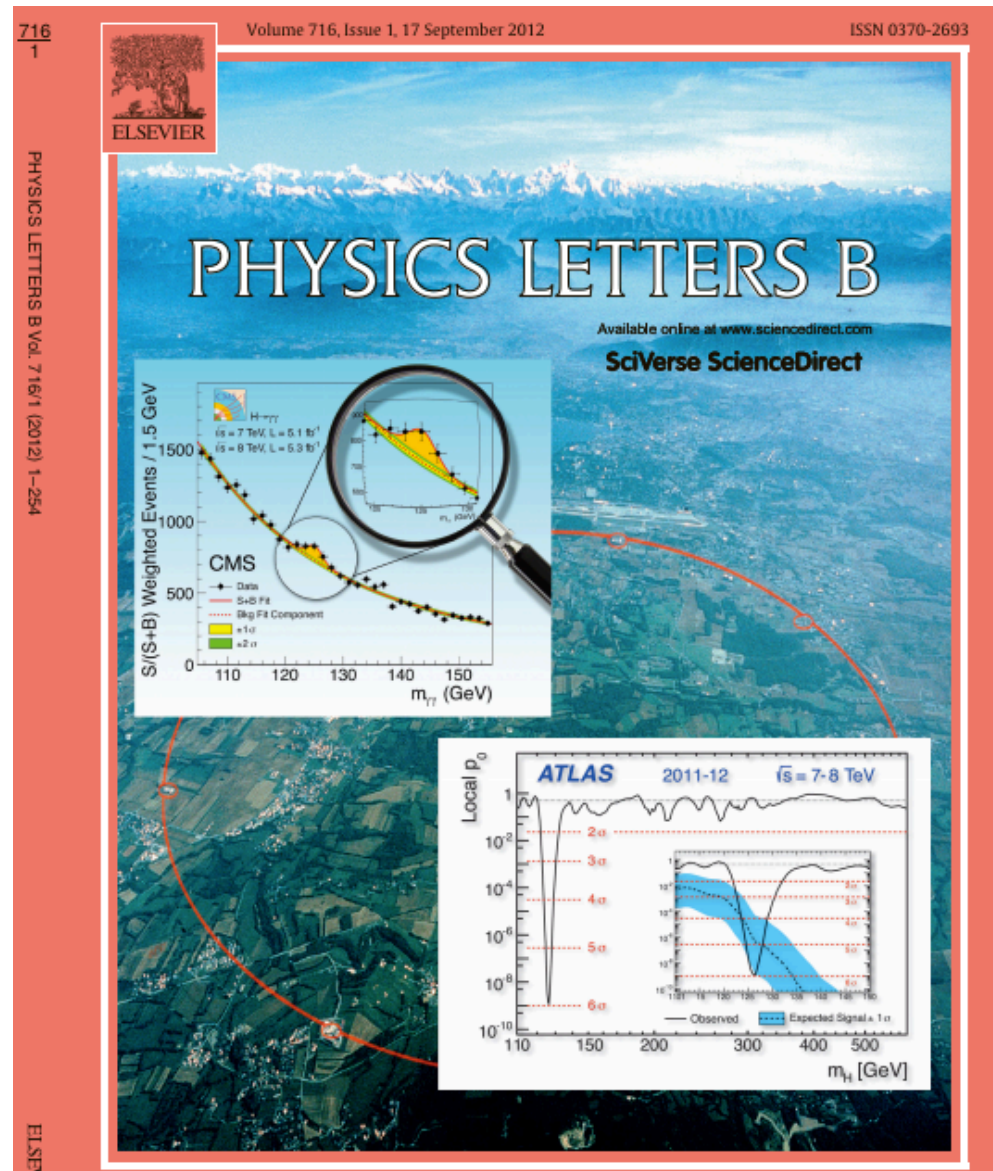
$H \rightarrow ZZ \rightarrow 4l$



$H \rightarrow WW \rightarrow l\nu l\nu$



Beobachtung einen neuen Teilchens in Suche nach dem Higgs-Boson

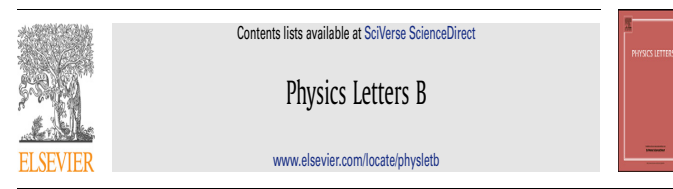


gemeinsame Präsentation der Ergebnisse am 4. Juli 2012

CMS $Z=4.9 \sigma$ (alle Kanäle) ATLAS $Z=5.0 \sigma$ (nur $\rightarrow ZZ \rightarrow 4l, \rightarrow \gamma\gamma$)



gemeinsame Submission an Physics Letters B am 31. Juli 2012



Observation of a new particle in the search for the Standard Model Higgs boson with the ATLAS detector at the LHC[☆]

ATLAS Collaboration^{*}

This paper is dedicated to the memory of our ATLAS colleagues who did not live to see the full impact and significance of their contributions to the experiment.

Observation of a new boson at a mass of 125 GeV with the CMS experiment at the LHC[☆]

CMS Collaboration^{*}

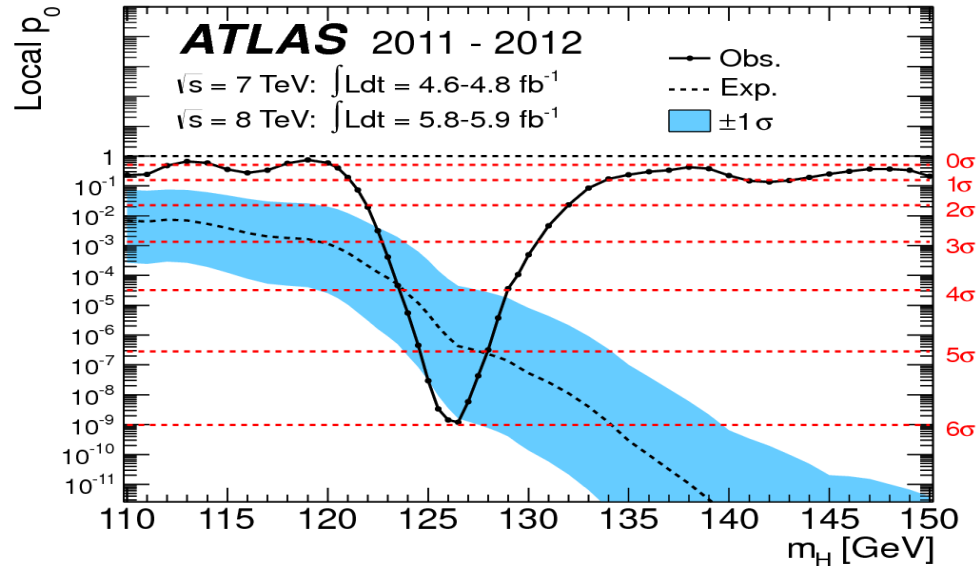
CERN, Switzerland

This paper is dedicated to the memory of our colleagues who worked on CMS but have since passed away. In recognition of their many contributions to the achievement of this observation.

Entdeckung: Signifikanzen und P-Werte

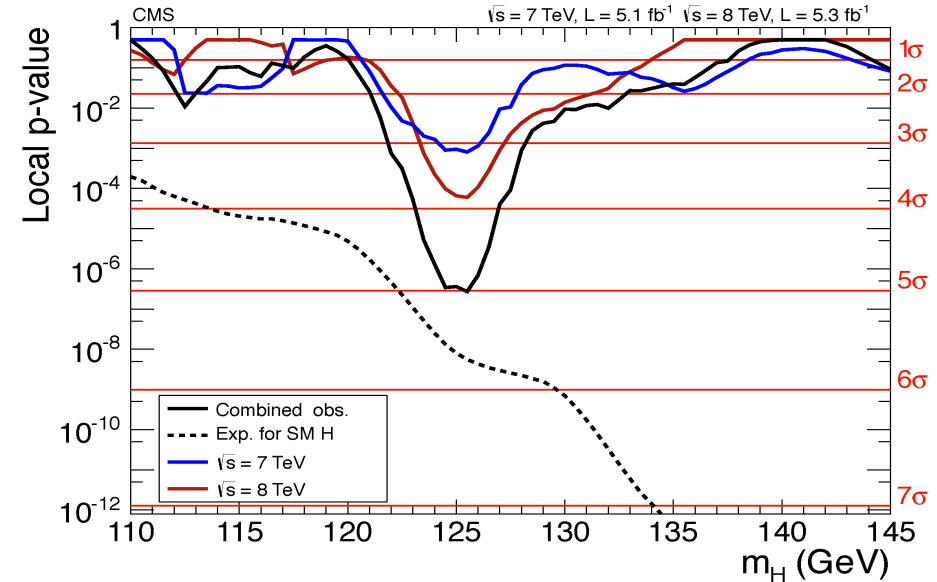
5.9 σ

für $m_H \sim 126.5$ GeV



5.0 σ

für $m_H \sim 125.5$ GeV



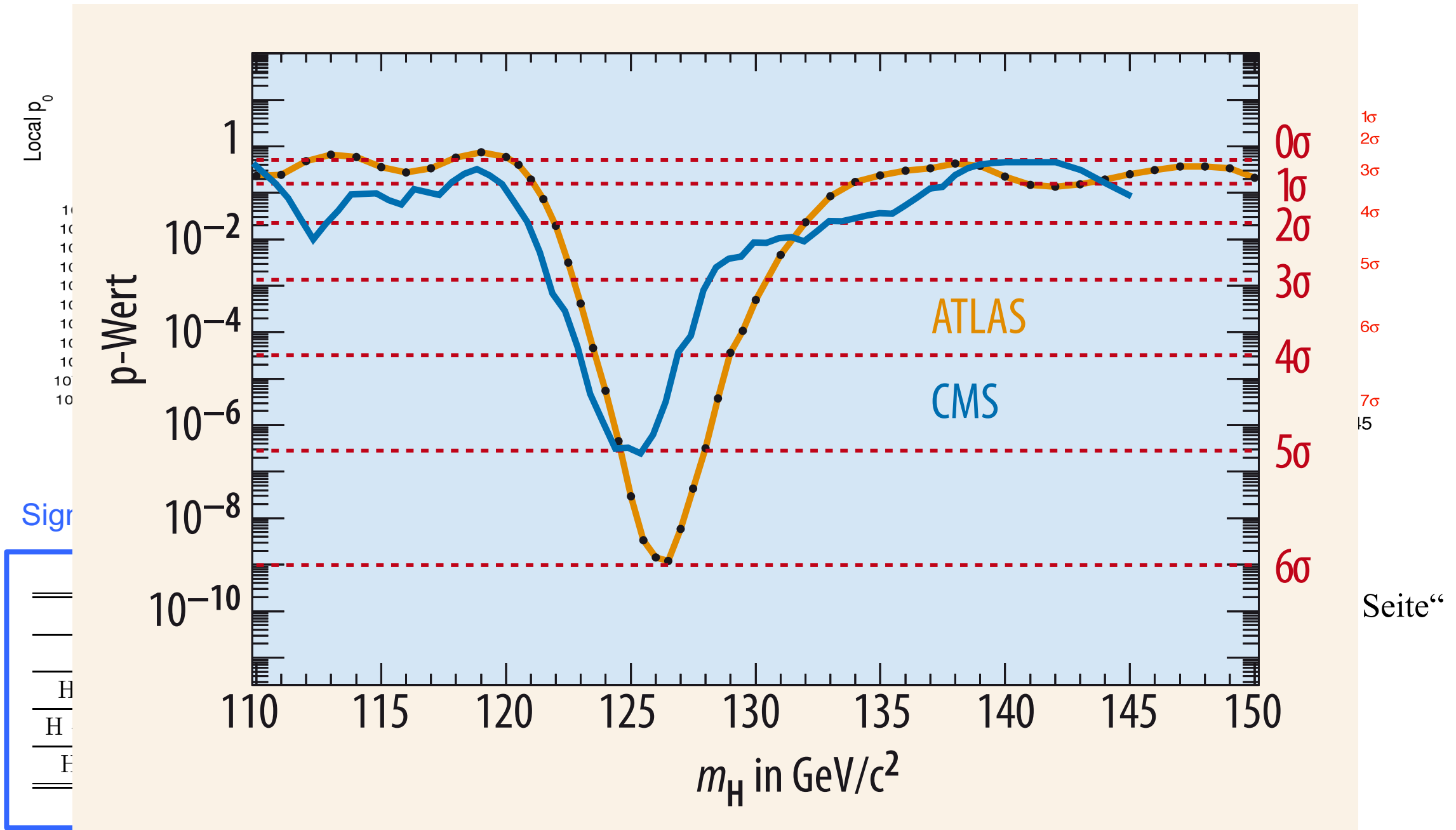
Signifikanzen in Zerfallskanälen und deren Kombination

channel	ATLAS			CMS		
	Z	$Z_{exp.}$	$M_{max.Z}$	Z	$Z_{exp.}$	$M_{max.Z}$
$H \rightarrow \gamma\gamma$	4.5	2.5	126.5 GeV	4.1	2.8	125 GeV
$H \rightarrow ZZ \rightarrow l^+l^-l'^+l'^-$	3.4	2.7	125.0 GeV	3.2	3.8	125.6 GeV
$H \rightarrow W^+W^- \rightarrow l^+\nu l^-\bar{\nu}$	2.8	2.3	125.0 GeV	1.6	2.4	—
$H \rightarrow b\bar{b} + H \rightarrow \tau^+\tau^-$	—	—	—	0.4	2.4	—
combined	5.9	4.9	126.5 GeV	5.0	5.8	125.5 GeV

ATLAS ist auf der „glücklichen Seite“
 Signifikanz: 5.9 (4.9 erwartet)

CMS hat „etwas Pech“
 Signifikanz: 5.0 (5.8 erwartet)

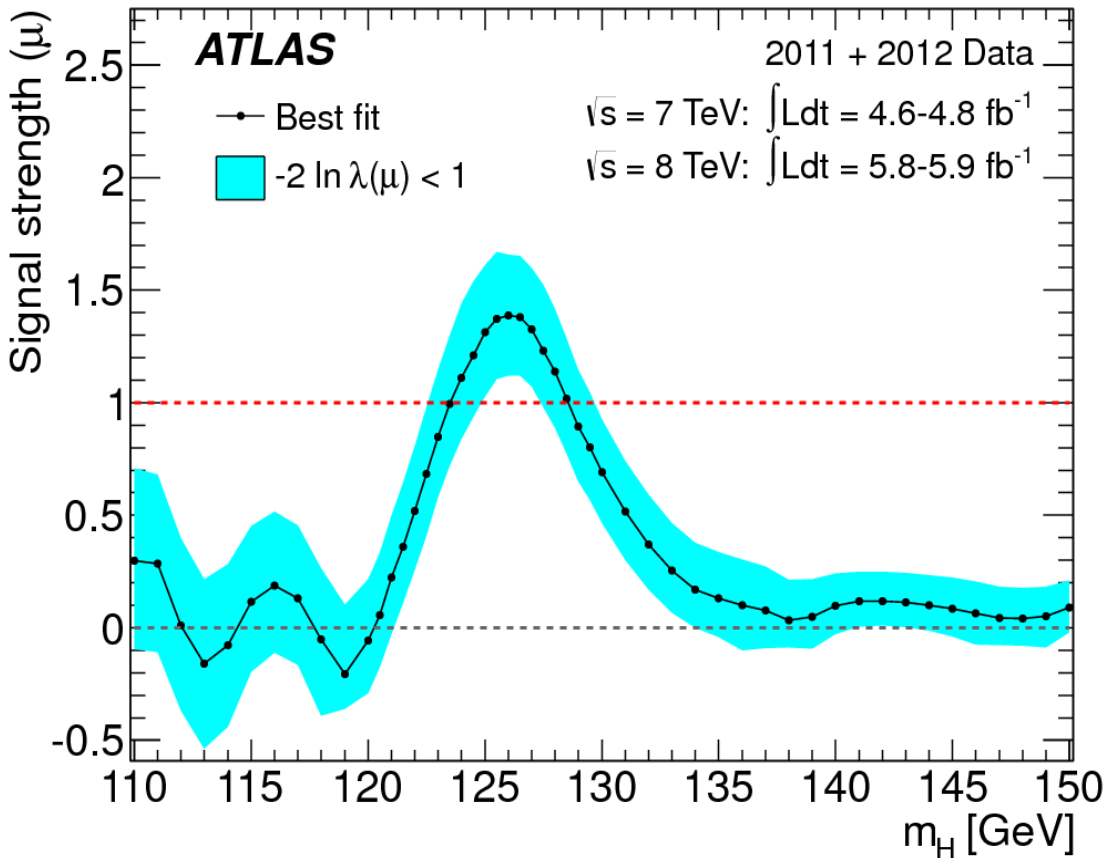
Entdeckung: Signifikanzen und P-Werte



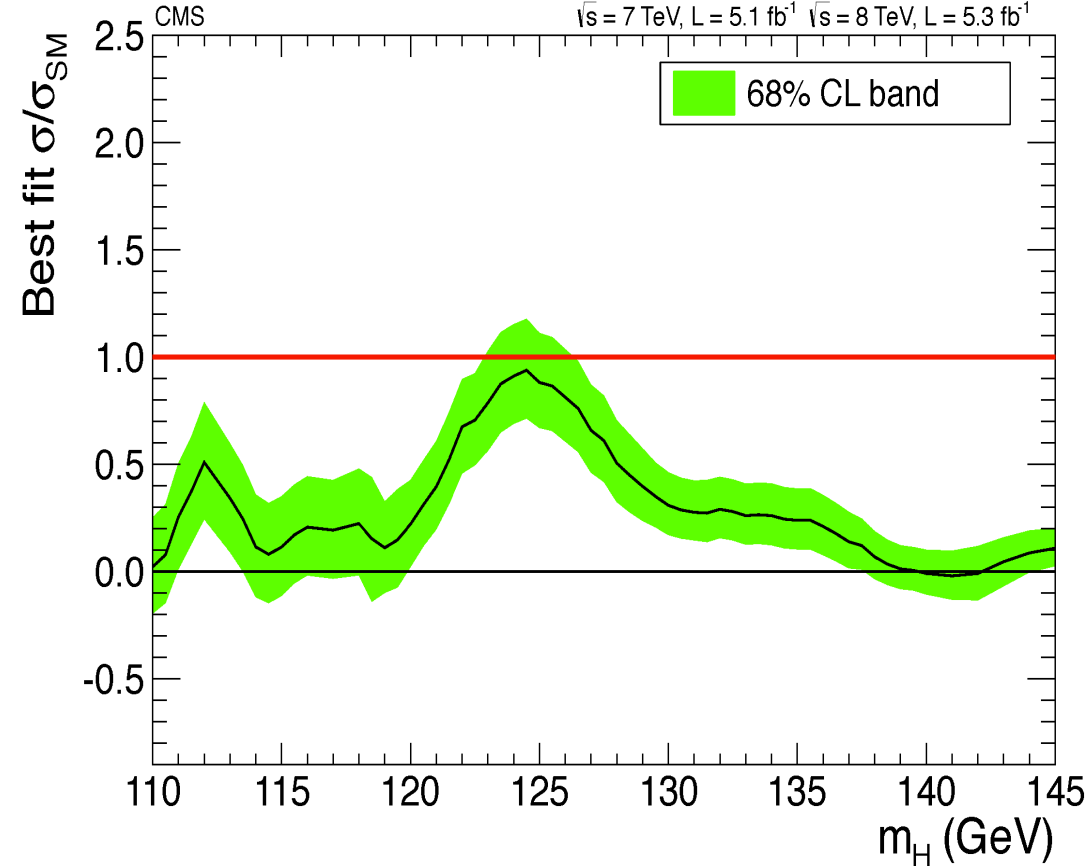
Anatomie des neuen Teilchens

Bestimmung der "besten" Signalstärke $\mu = \sigma_{\text{beob}}/\sigma_{\text{SM}}$

Annahme: Verhältnisse von σ_{Prod} und BR wie im Standardmodell



größte Signalstärke bei $m_H = 126.0 \text{ GeV}$
 $\mu = 1.4 \pm 0.3$

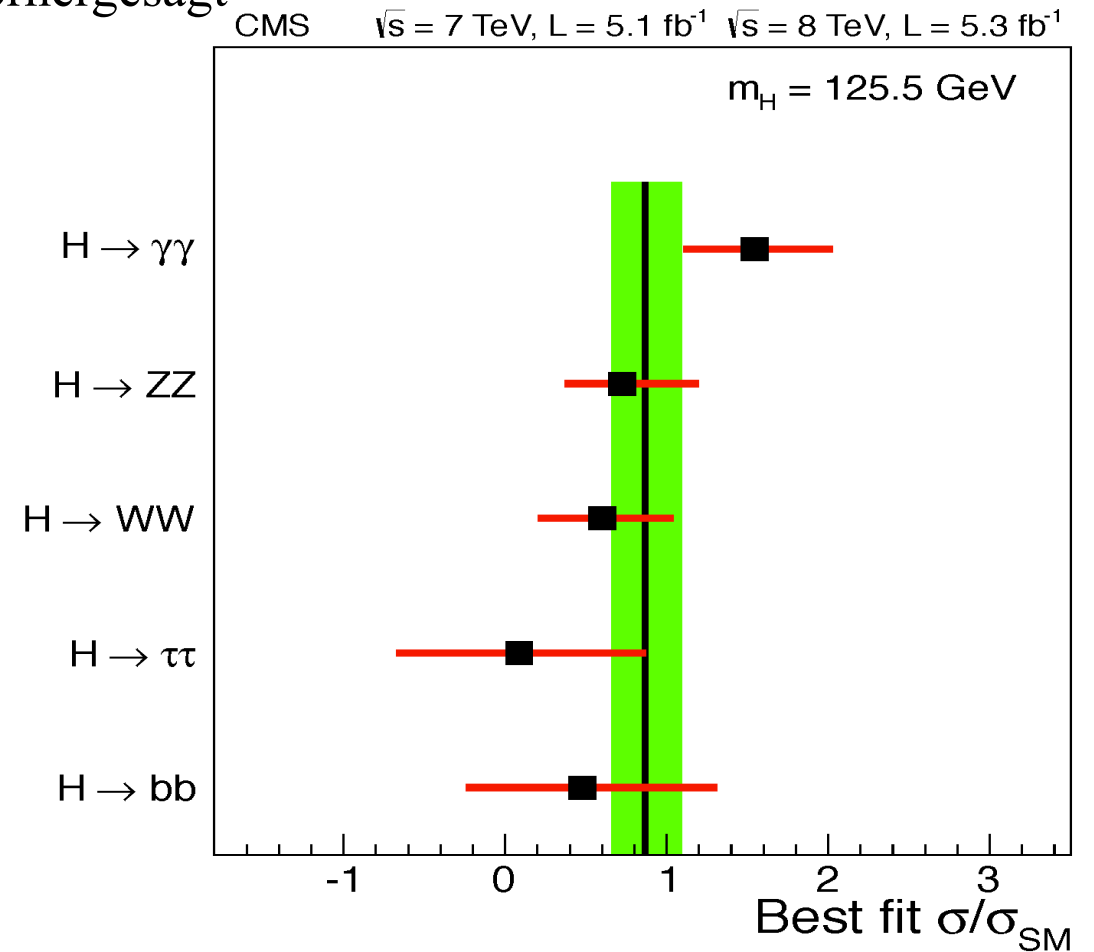
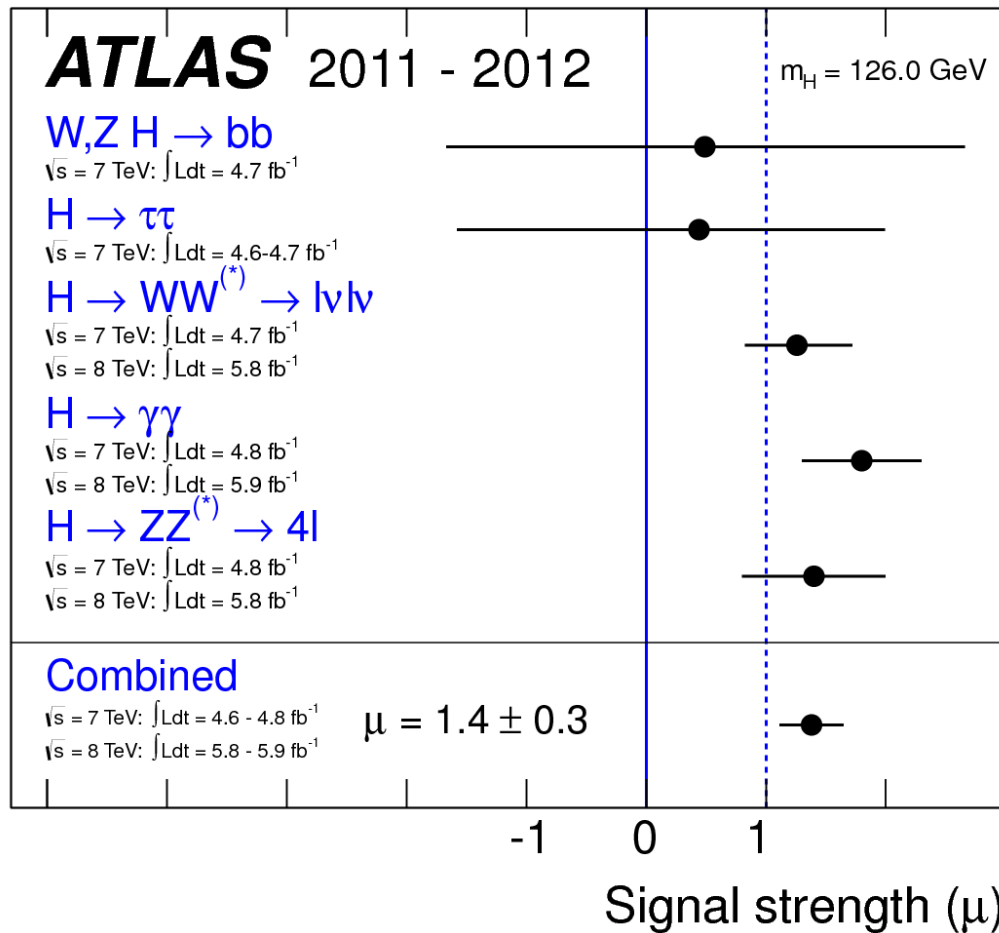


größte Signalstärke bei $m_H = 125.5 \text{ GeV}$
 $\mu = 0.87 \pm 0.23$

konsistent mit Erwartung im Standardmodell ($\mu=1$)

Signalstärke in den einzelnen Zerfällen

Annahme: Verhältnisse von Produktionsraten wie im SM vorhergesagt



Keine Abweichung von der Vorhersage im Standardmodell beobachtet
 In fermionischen Zerfällen $H \rightarrow bb$ und $\tau\tau$ keine konklusive Aussage möglich

Status unserer Kenntnis über das neue Teilchen im Juli 2012

Ladung und Spin:

Entdeckung in Zerfällen in Eichbosonen mit Spin = 1 und Ladungssumme = 0

→ elektromagnetisch neutral, Spin ganzzahlig 0, 1, 2, ...

Spin = 1 ausgeschlossen durch Landau-Yang-Theorem:

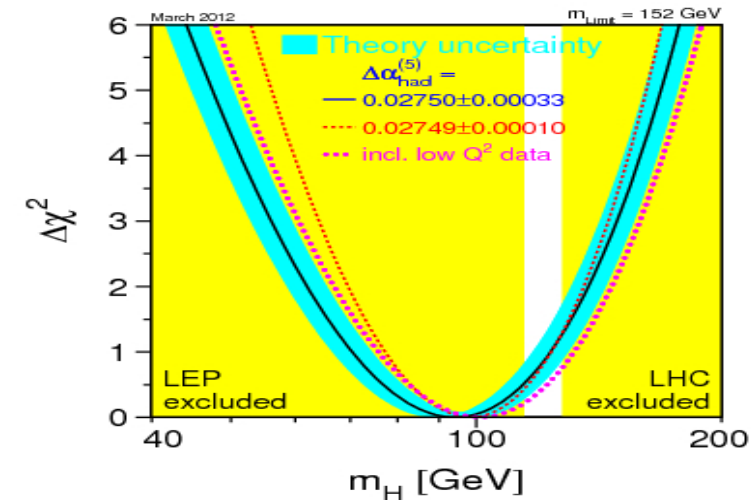
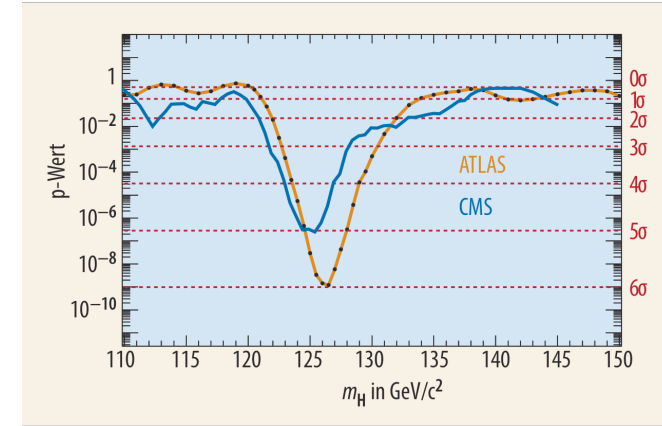
massives Spin-1-Teilchen kann nicht in zwei masselose identische Spin-1-Teilchen (i.e. Photonen) zerfallen

Masse:

- Masse mit einer Genauigkeit von 0.5 % aus Peaks in $H \rightarrow \gamma\gamma$ und $H \rightarrow ZZ \rightarrow 4$
ATLAS: $126.0 \pm 0.4 \pm 0.4$ GeV CMS $125.3 \pm 0.4 \pm 0.5$ GeV
- Konsistent mit bevorzugtem Bereich im SM

Kopplungen:

- Beobachtete Signalstärken in Produktionsmoden und Zerfallskanälen
- konsistent mit der Vorhersage im SM
- Gesamtsignalstärke mit Genauigkeit von 25%
- Signalstärke in bosonischen Zerfallsmoden mit Genauigkeit < 50%
- Kein Hinweis auf fermionische Zerfälle / Kopplung von Higgs an Fermionen



Fragen und nächste Schritte nach der Entdeckung (Bsp.)



Ist es ein Higgs-Boson?

Bestimme den Spin und zeige, dass das Higgs-Feld skalar (Spin=0) ist

Ist der B.E.H.G.H.K.-Mechanismus auch für die Masse der Fermionen verantwortlich?

Weise die Kopplung an Fermionen nach z.B. durch Zerfälle in Fermionen

Ist es das Higgs-Bosons des Standardmodells?

Messe die Masse mit großer Genauigkeit, um Profil vollständig festzulegen

Messe möglichst viele Produktionsreaktionen und Zerfallsmoden und

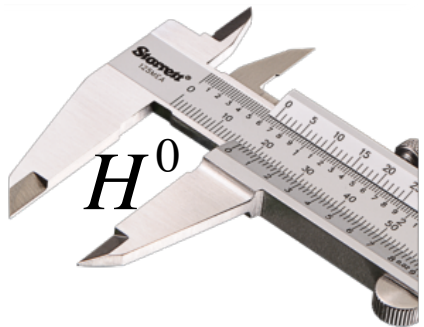
extrahiere die Kopplung des Higgs and andere Teilchen

→ Suche nach Abweichungen von der Vorhersage im SM

→ Suche nach Zerfällen, die im Standardmodell nicht vorhergesagt werden

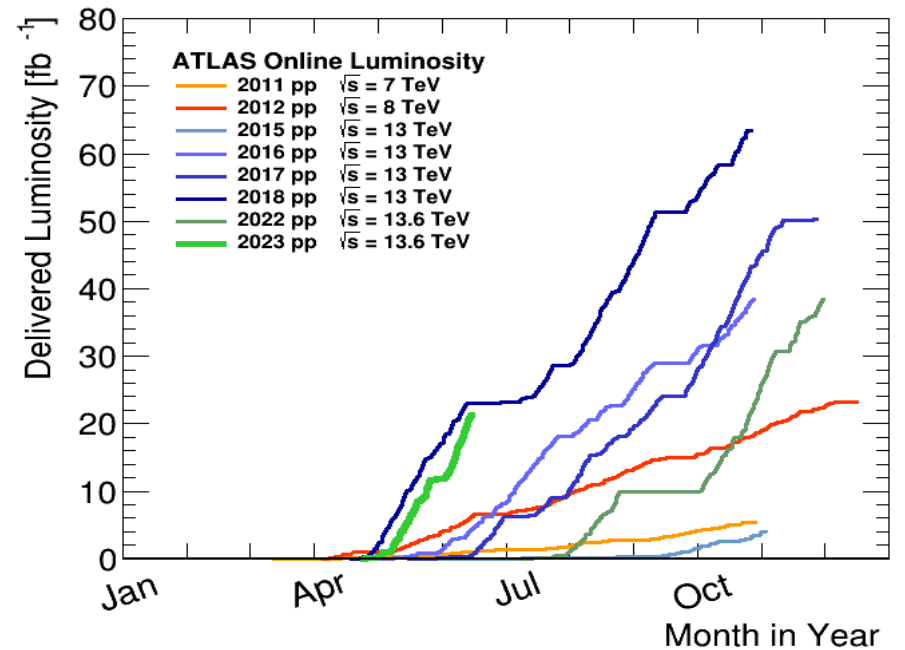
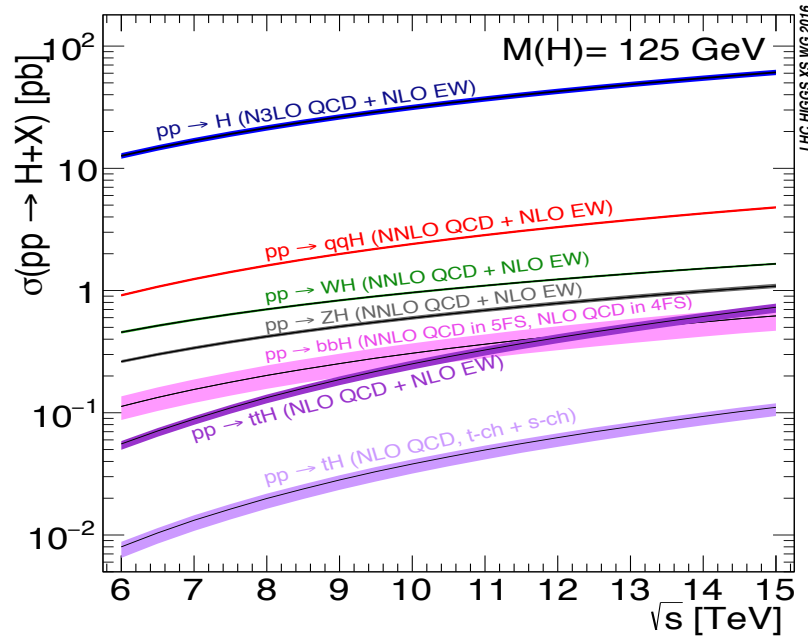
→ Suche nach Eigenschaften die im Standardmodell verboten sind

und noch vieles mehr



Erhöhte Sensitivität durch vergrößerten Datensatz und \sqrt{s}

$\sqrt{s} = 13$ in Run2 (2015-2018) \rightarrow Produktionsrate um Faktor 2.3 vergrößert als bei $\sqrt{s} = 8$ TeV
 Aufgezeichneter Datensatz in Run-2 um einen Faktor 5.5 (15.5) größer als in Run 1 (bei Entdeckung)



Exzellenter Betrieb des LHC und der Experimente

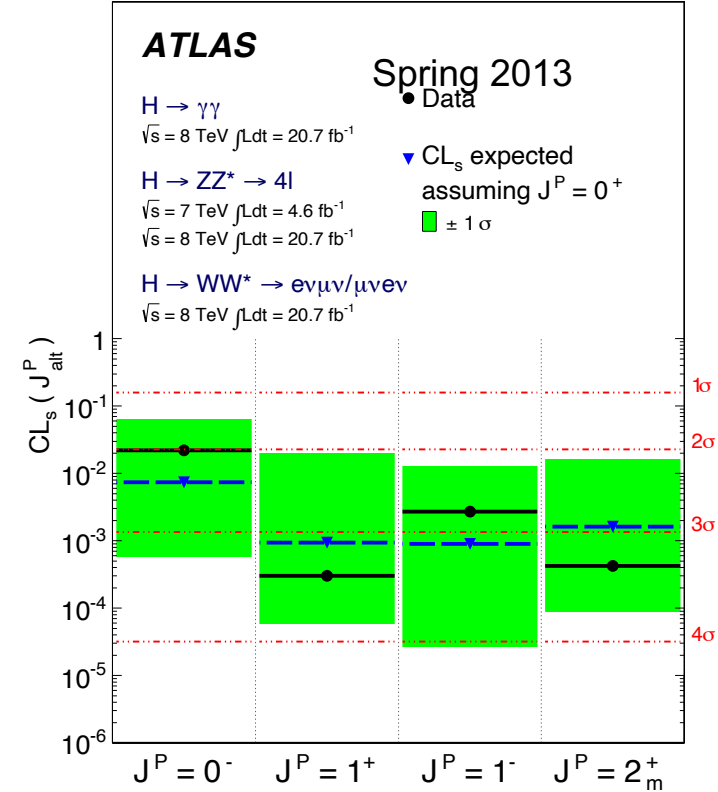
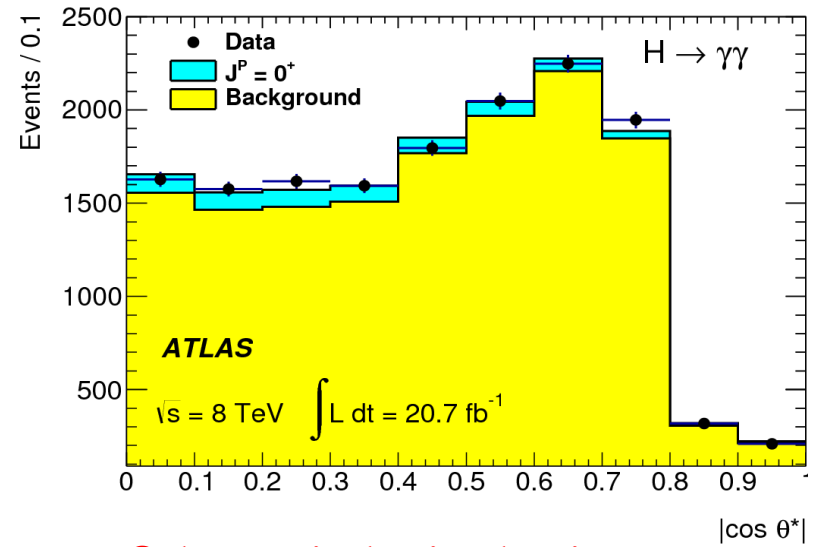
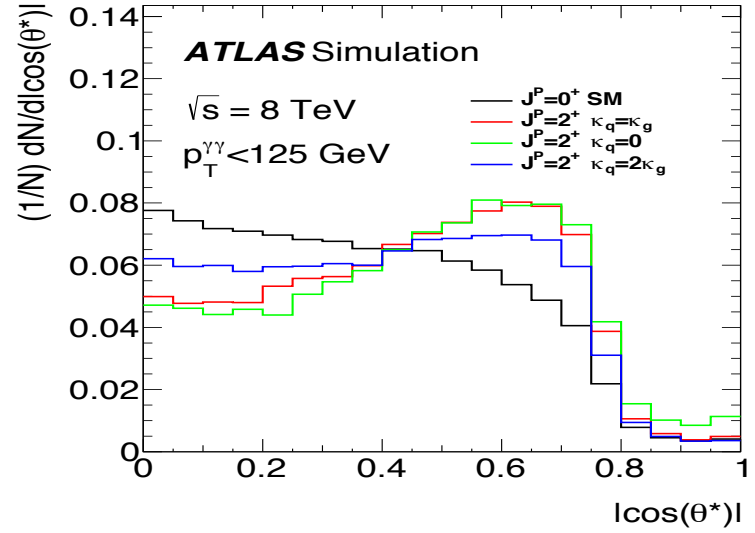
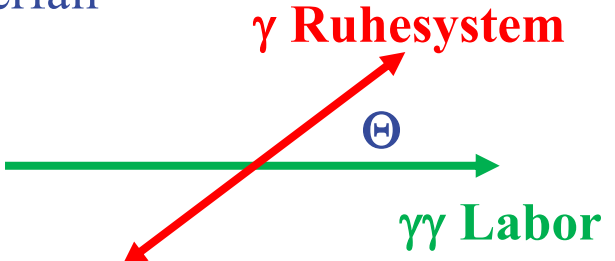
Datensatz	Kollisionen	H produziert
Juli 2012	720×10^{12}	200 000
Run-1 (11/12)	1830×10^{12}	560 000
Run-2 (15/16)	3000×10^{12}	2 200 000
Run-2 komplett	$12\,000 \times 10^{12}$	8 800 000

44 mal mehr produzierte Higgs-Bosonen als bei der Entdeckung

- \rightarrow genauere Messungen
- \rightarrow Messungen von kleineren Signalraten

Bestimmung von Spin und CP-Quantenzahlen ($J^{CP} = 0^+$ im SM)

Spin = 0 \rightarrow keine Richtung präferiert \rightarrow isotroper Zerfall
 Beispiel: $H \rightarrow \gamma\gamma$ Zerfall
 Observable $\cos \Theta$:



Signifikanz für Ausschluss Z

Alternative J^{CP} -Hypothesen
 ausgeschlossen mit $>95\%$ CL

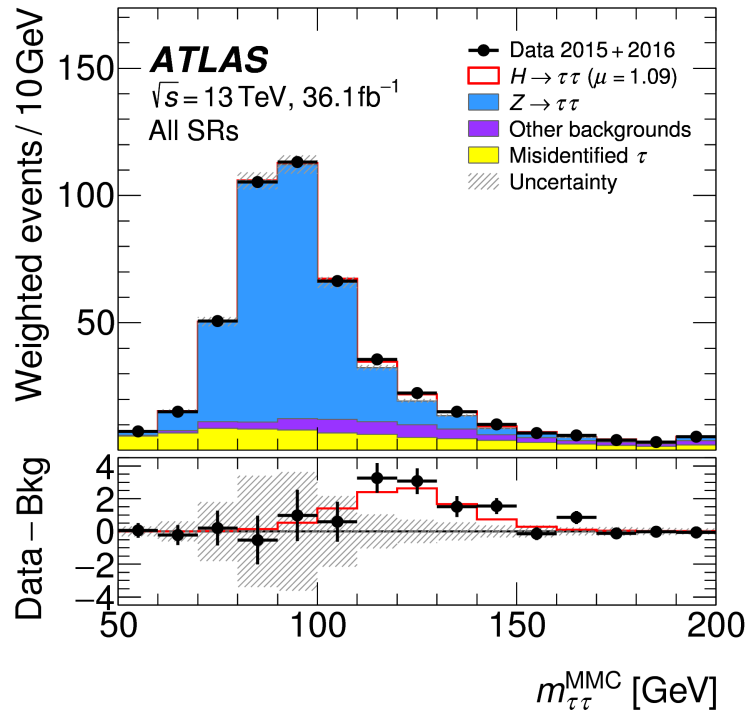


Erste Evidenz für skalare Natur im Frühjahr 2013 \rightarrow Seitdem “Es ist ein Higgs-Boson”
 Nobel-Preis für Physik im Herbst 2013 an F. Englert und P.W. Higgs

Beobachtung der fermionischen Zerfälle: $H \rightarrow \tau\tau$ und $H \rightarrow bb$

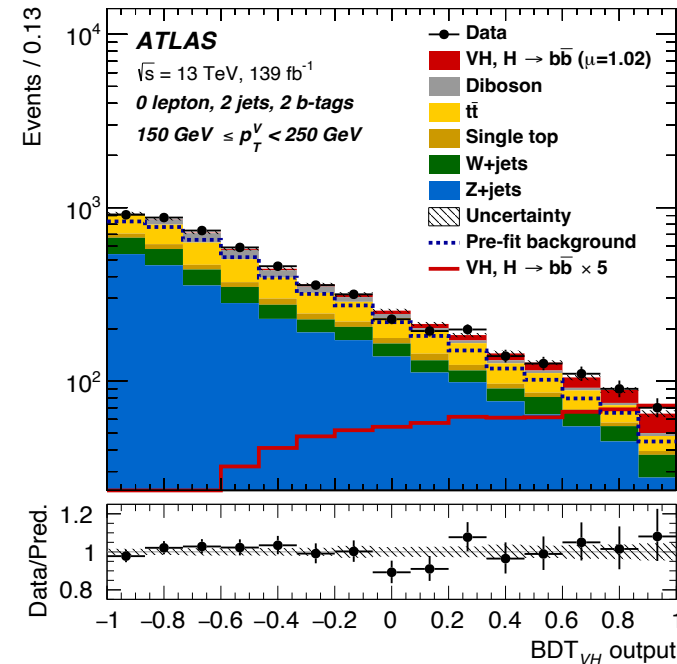
Sehr komplexe Analysen, limitierte Massenrekonstruktion, viele (resonante) Untergrundbeiträge

$H \rightarrow \tau\tau$ in VBF (+GGF)

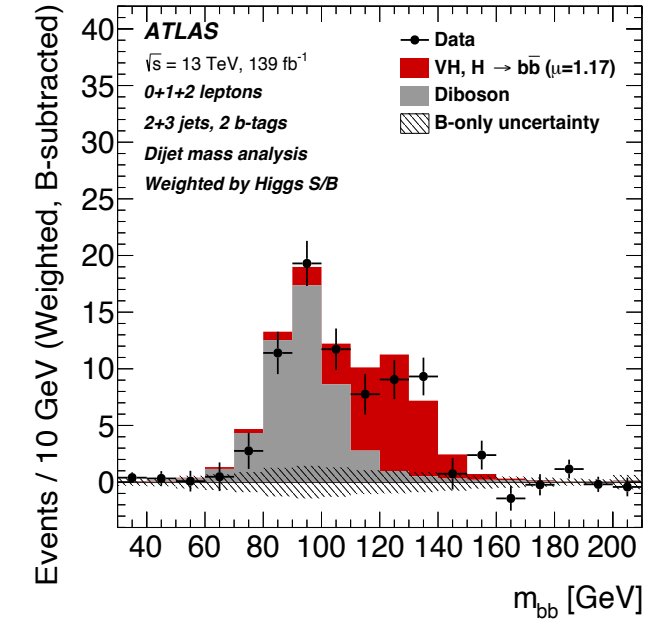


Kombination von Run 1 + Run 2 (2015/16)
 Signifikanz von 6.4 (5.4 erw.) \rightarrow Beobachtung

$H \rightarrow bb$ in Higgs-Strahlung (WH/ZH)



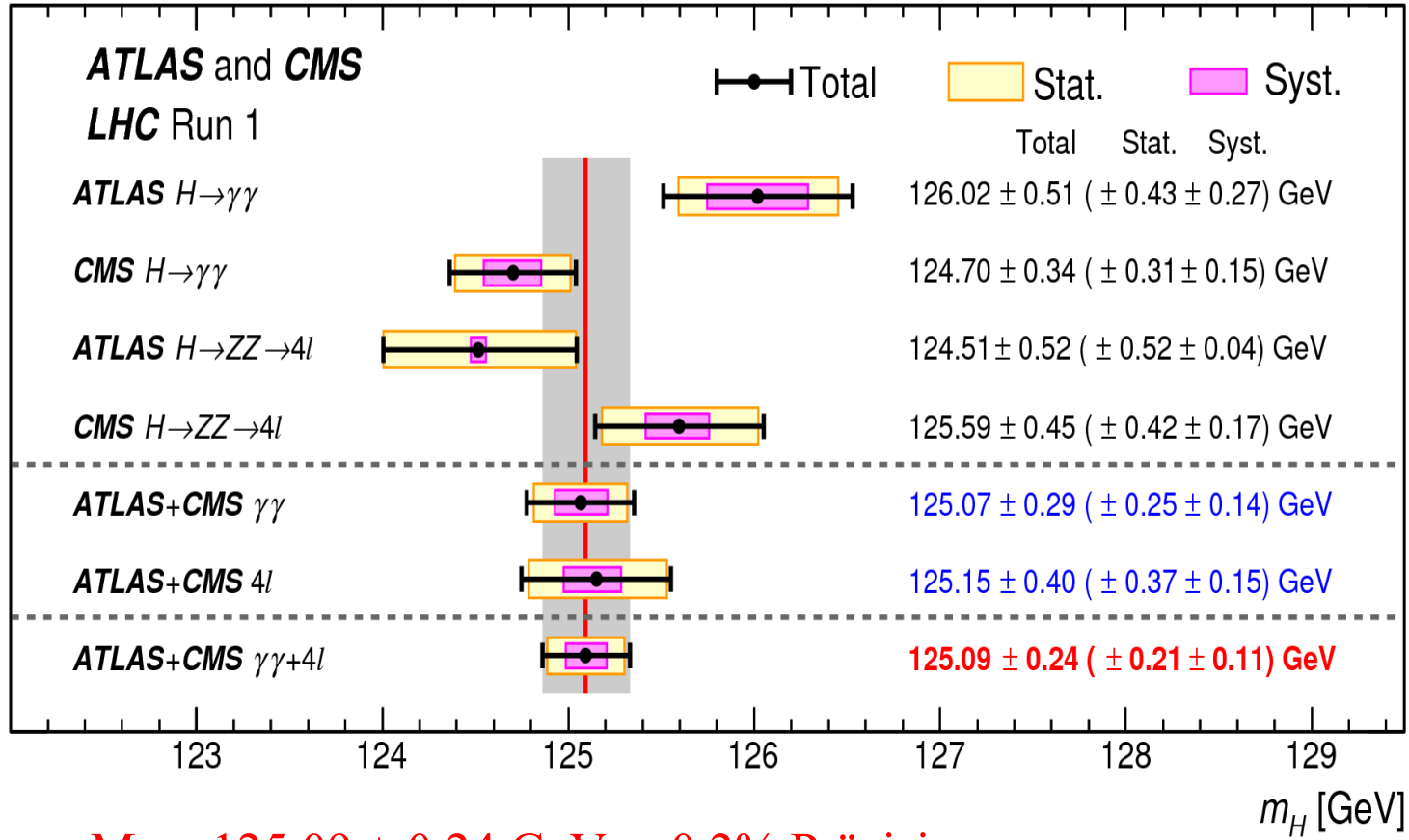
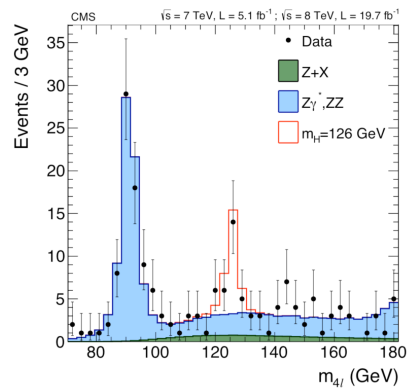
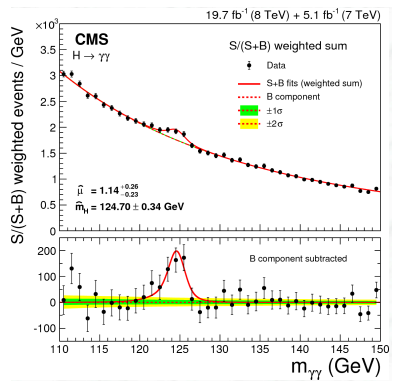
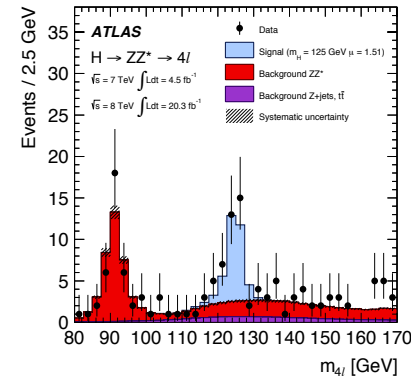
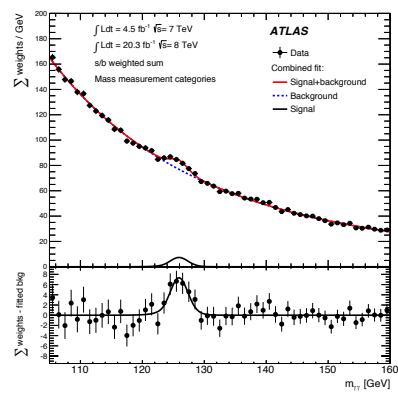
Volständiger Datensatz aus Run 2
 Signifikanz $Z = 6.7$ (6.3 erw.) \rightarrow Beobachtung



Bestimmung der Masse des Higgs-Bosons

Aus Massenpeaks in
 $H \rightarrow \gamma\gamma$ und $H \rightarrow ZZ \rightarrow 4l$

Messung der Masse in ATLAS und CMS und Kombination
 mit dem kompletten Datensatz aus Run-1



Verlangt Verständnis von
 Energieskalen und -auflösungen
 auf Niveau von besser als 0.1%

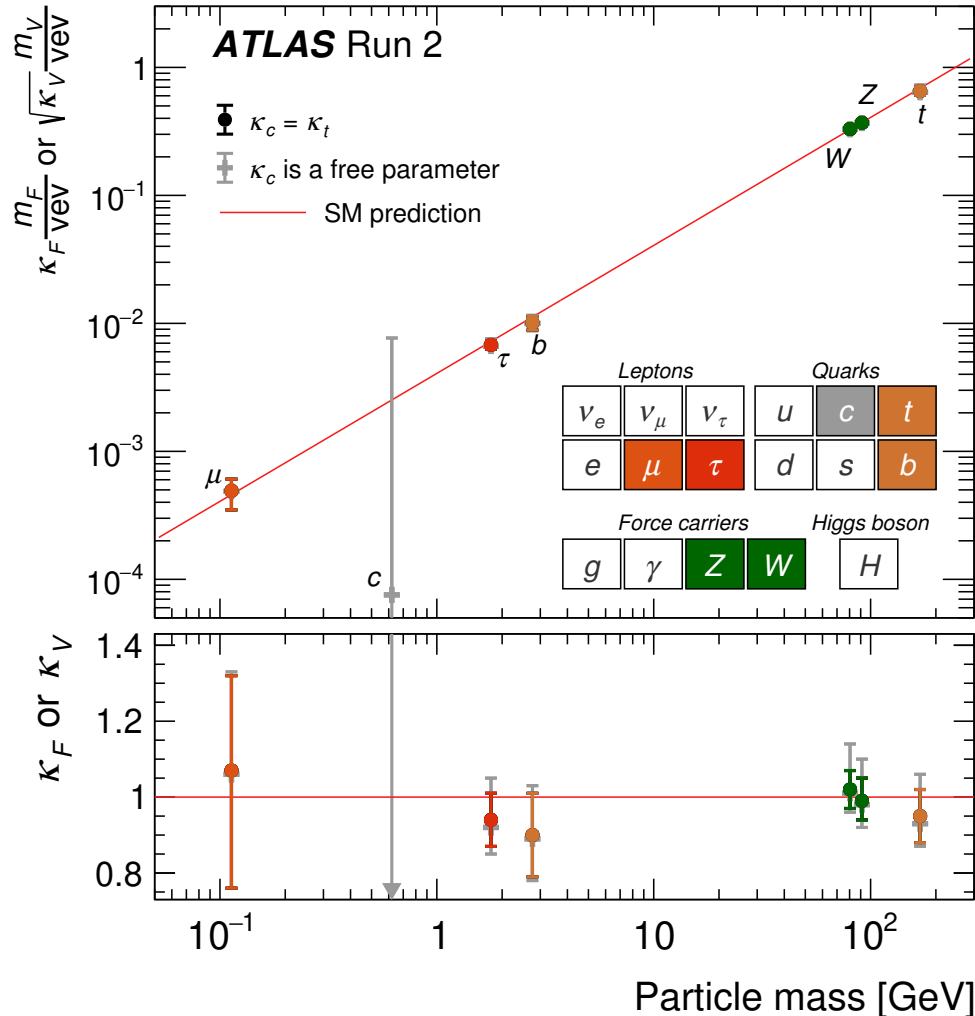
$M_H = 125.09 \pm 0.24 \text{ GeV}$ 0.2% Präzision
 Genauigkeit ausreichend für Festlegung des Profils

Messung von Kopplungen

Alle “großen” Produktionsprozesse GGF, VBF, WH, ZH, ttH beobachtet

Alle “großen” Zerfallskanäle $\gamma\gamma$, WW, ZZ, $\tau\tau$, bb beobachtet

→ Kombiniere alle Messungen, um Kopplungen des Higgs-Bosons zu extrahieren



“kappas” κ = beobachtete Kopplung / Vorhersage im SM

Messung folgt der Vorhersage im Standardmodell

Genauigkeit für W und Z ~5 %;

Genauigkeit für τ, b, t 7 bis 12%

(stat. und syst. Unsicherheit etwa gleich groß)

Annahmen in der Interpretation:

- kein neue Beiträge in Schleifen

- keine unsichtbaren oder undetektierten Zerfälle

Das Higgs-Boson als Werkzeug zur Beantwortung offener Fragen

Dunkle Materie (DM) $\sim 27\%$ des Energieinhalts des Universums

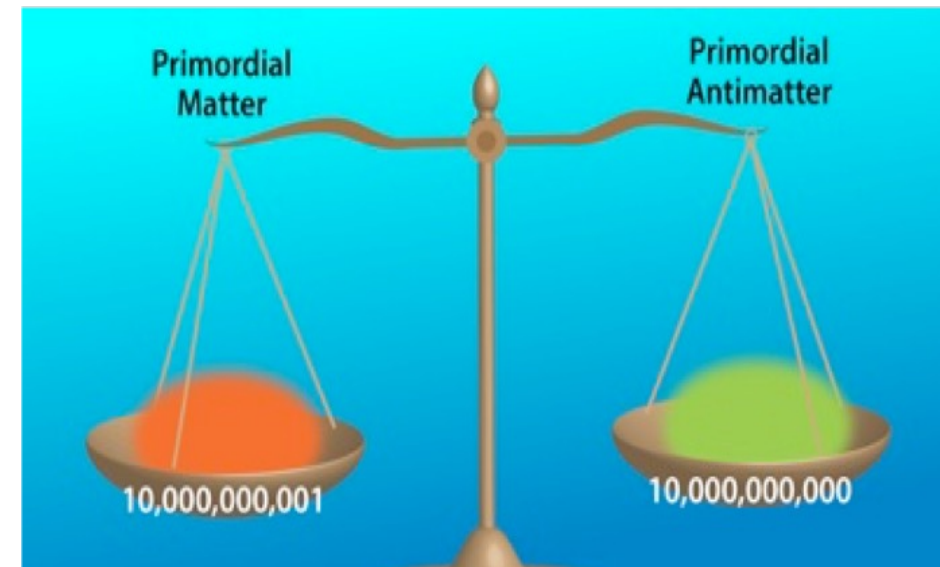
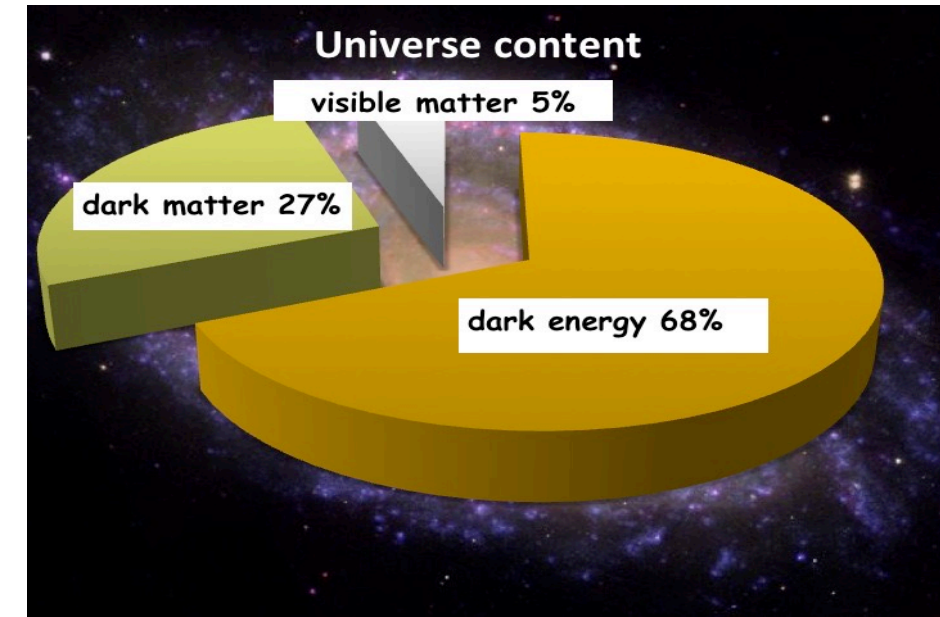
In speziellen Modellen (Higgs-Portale) koppelt Dunkle-Materie-Teilchen nur an Higgs-Boson

→ Suche nach unsichtbaren Higgs-Boson-Zerfällen
 $H \rightarrow DM DM$ für $M_{DM} < \frac{1}{2} M_H$

Baryon-Asymmetry des Universums (BAU)
Im frühen Universum Asymmetrie von Materie und Antimaterie auf Niveau von 10^{-11}

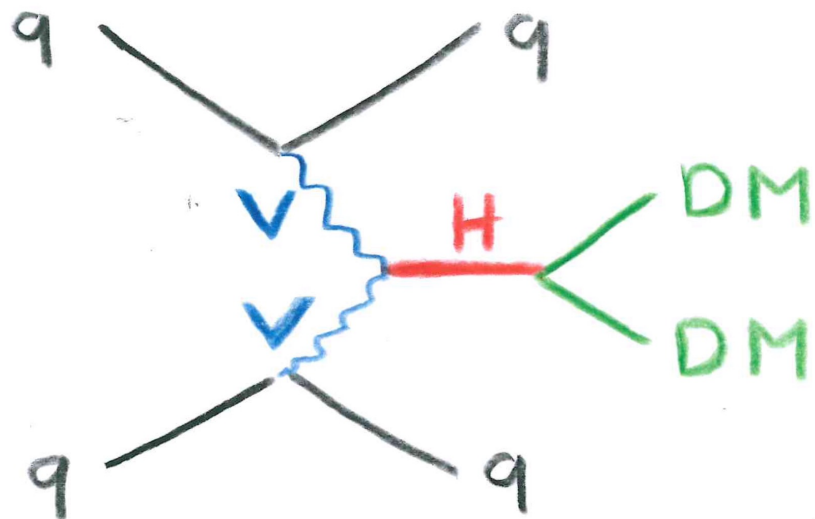
CP-Verletzung (CPV) benötigt zur Erklärung der Asymmetrie
CPV im SM zu schwach um Größe der BAU zu erklären

→ Suche nach neuen Quellen von CPV im Higgs-Sektor



Suche nach unsichtbaren Higgs-Boson-Zerfällen $H \rightarrow \text{DM DM}$

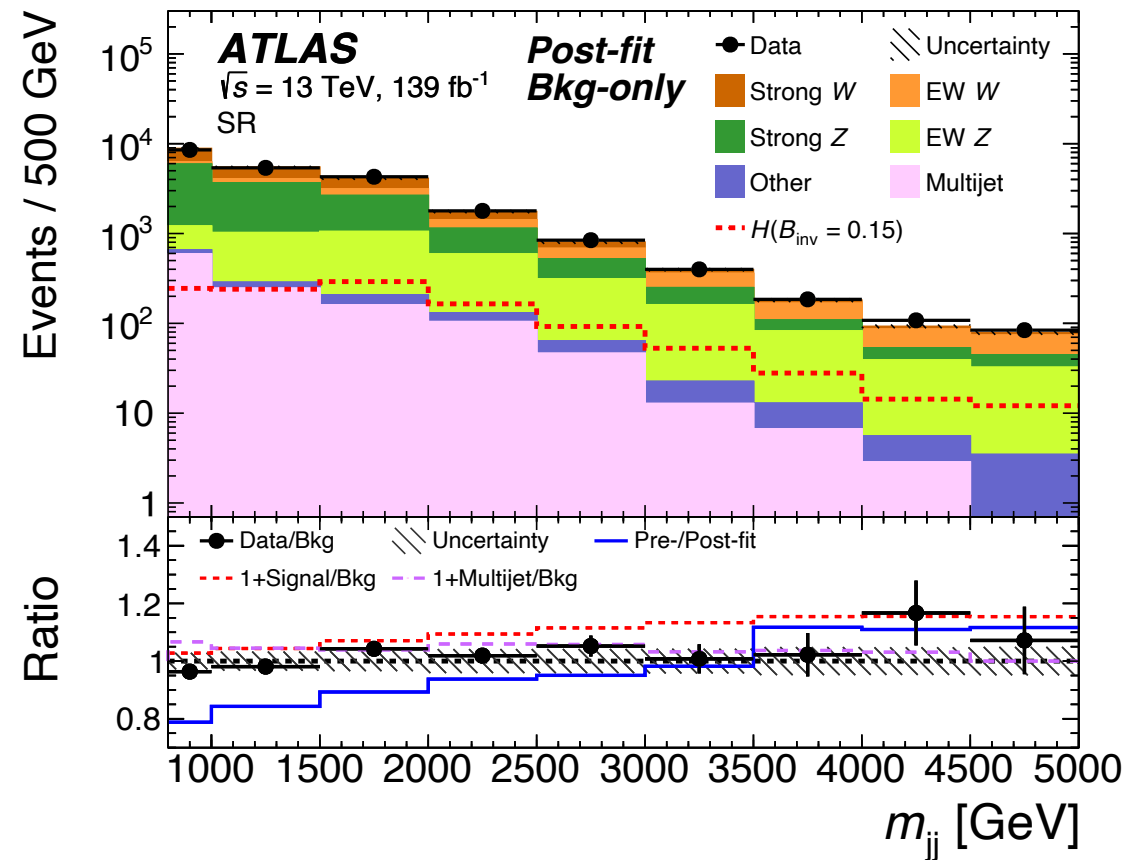
Produktion über VBF größte Sensitivität



Signatur: 2 Jets mit großer invarianter Masse

Bisher keine Hinweise auf unsichtbare Zerfälle
 → Grenzen auf Verzweigungsverhältnis $B(H \rightarrow \text{inv.})$

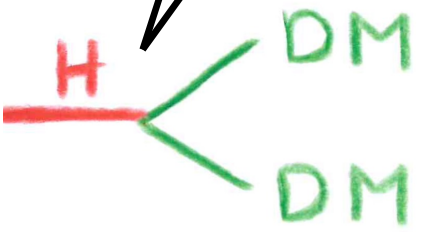
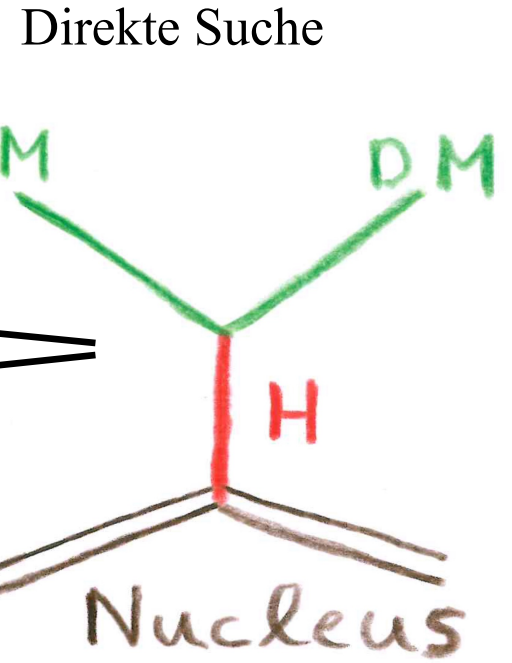
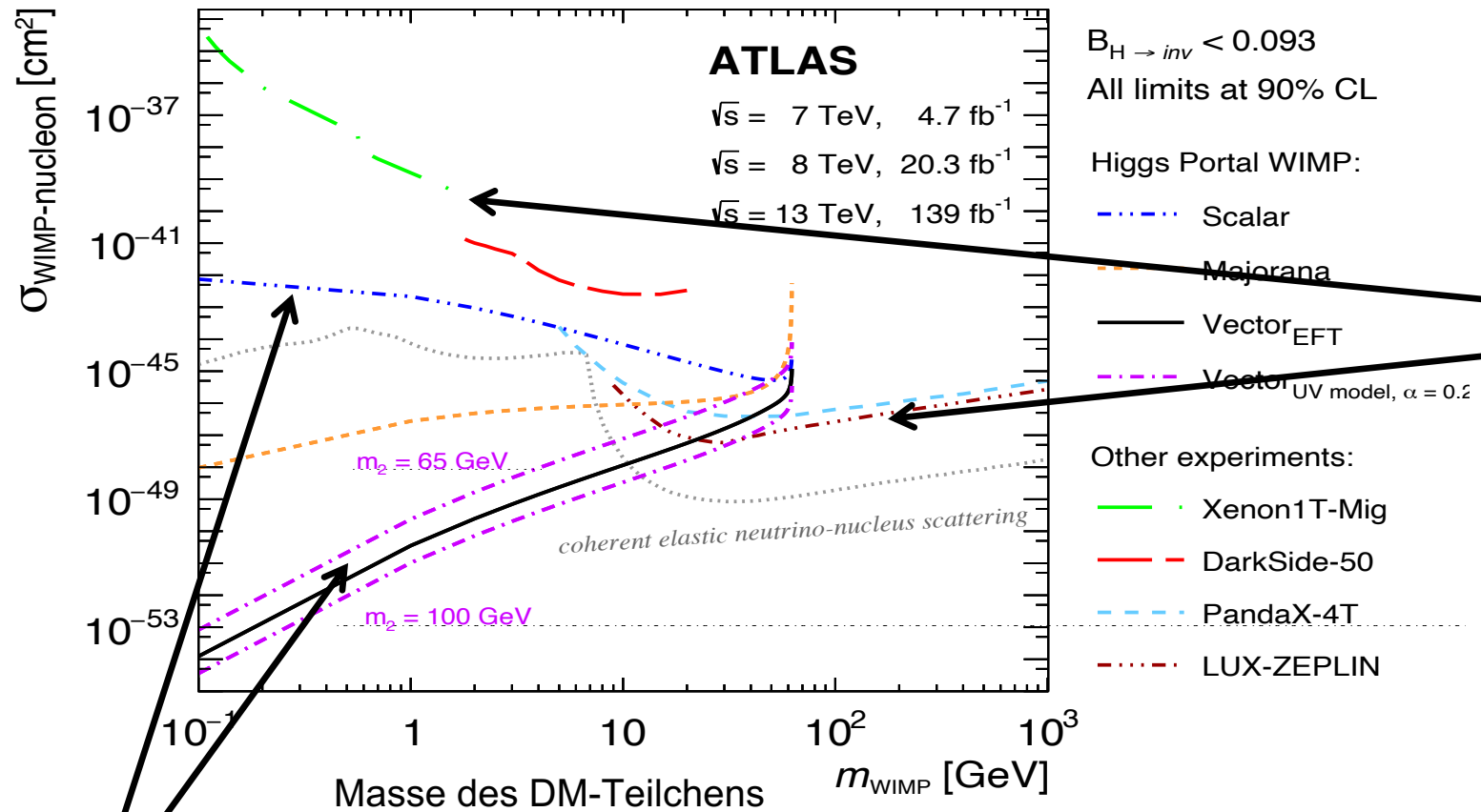
Suche nach Überschuss bei großer M_{JJ}



VBF: $BR(H \rightarrow \text{inv}) < 0.145$ (0.103 erw.)
 alle Produktionsmechanismen: $< 0.107'$ (0.077 erw.)

Higgs-Boson \rightarrow DM DM: Vergleich mit direkter Suche nach DM

Grenzen auf Streuwirkungsquerschnitt mit Materie



Grenzen aus $H \rightarrow \text{DM DM}$ sind komplementär und stringenter für kleine Massen des DM-Teilchens als aus direkten Suchen (unter gewissen Annahmen)

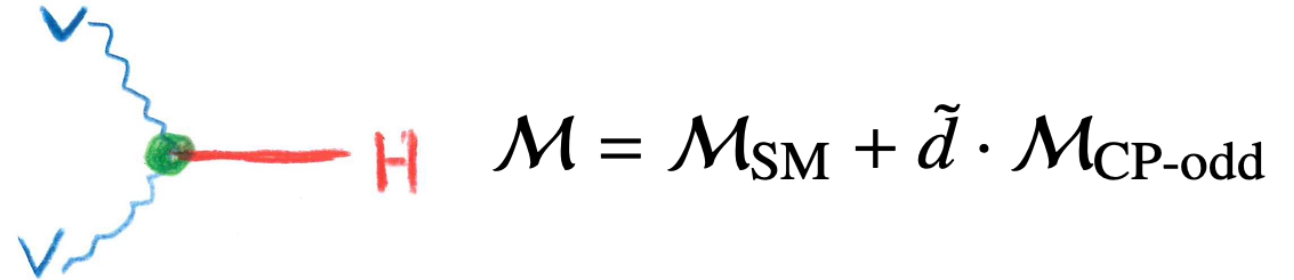
Suche nach neuen Quellen von CP-Verletzung

Im SM ist das Higgs-Boson CP-gerade (CP=++) → keine CP-Verletzung (CPV)

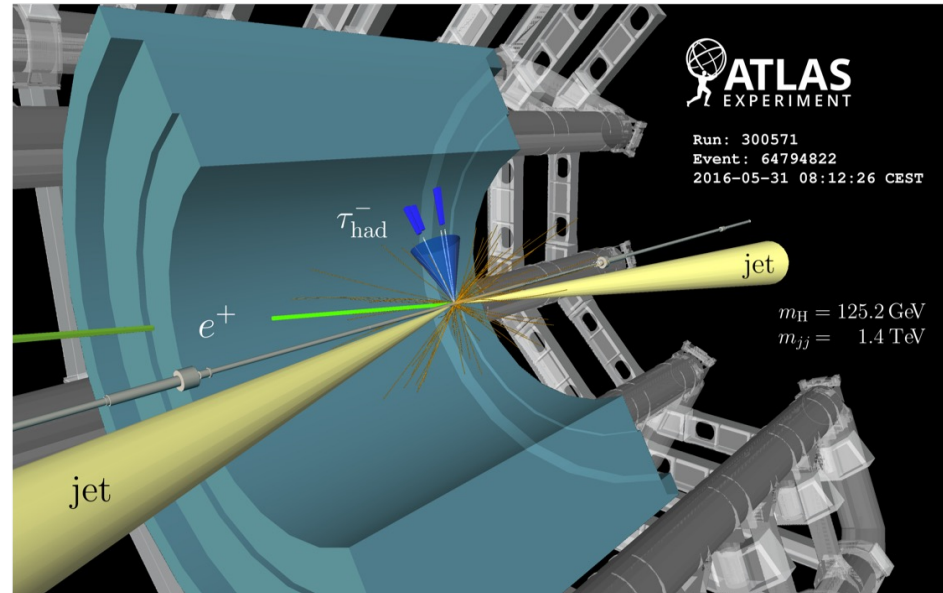
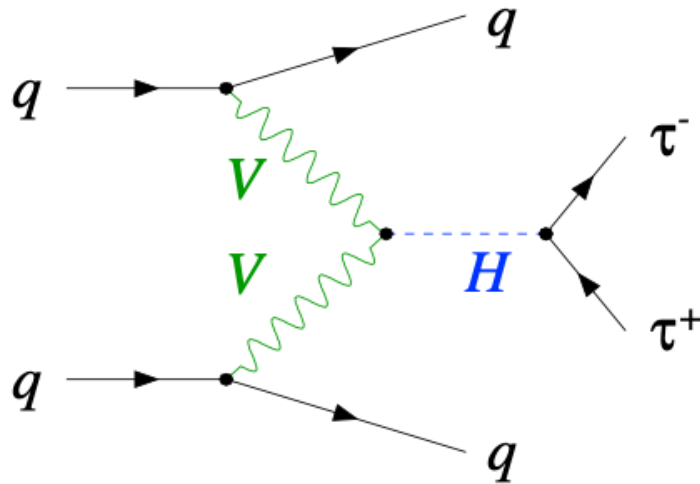
Suche nach CPV ist Suche nach Physik jenseits des Standardmodells

Modellunabhängige Parametrisierung der Stärke der CPV für jedes Teilchen

z.B. Kopplung an elektroschwache Eichbosonen



Experimentell zugänglich
über Vektorbosonfusion

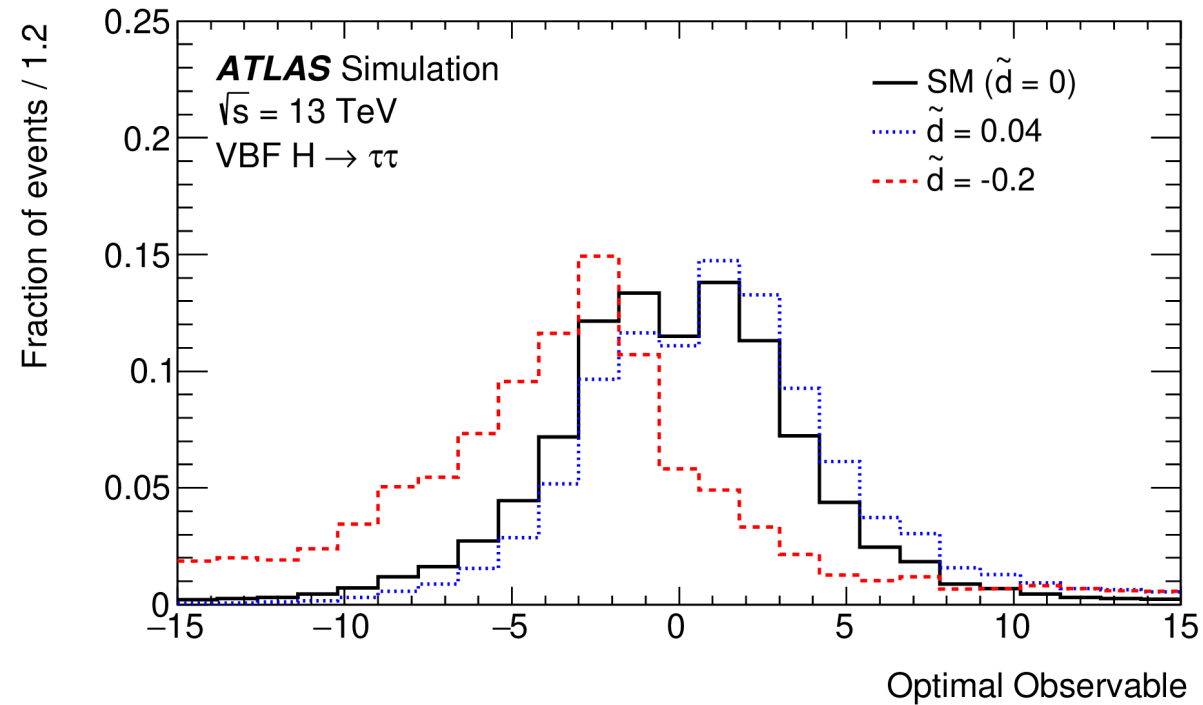


Aufgaben:

- selektiere Endzustand
- rekonstruiere die Viererimpulse von Higgs-Boson und auslaufenden Jets

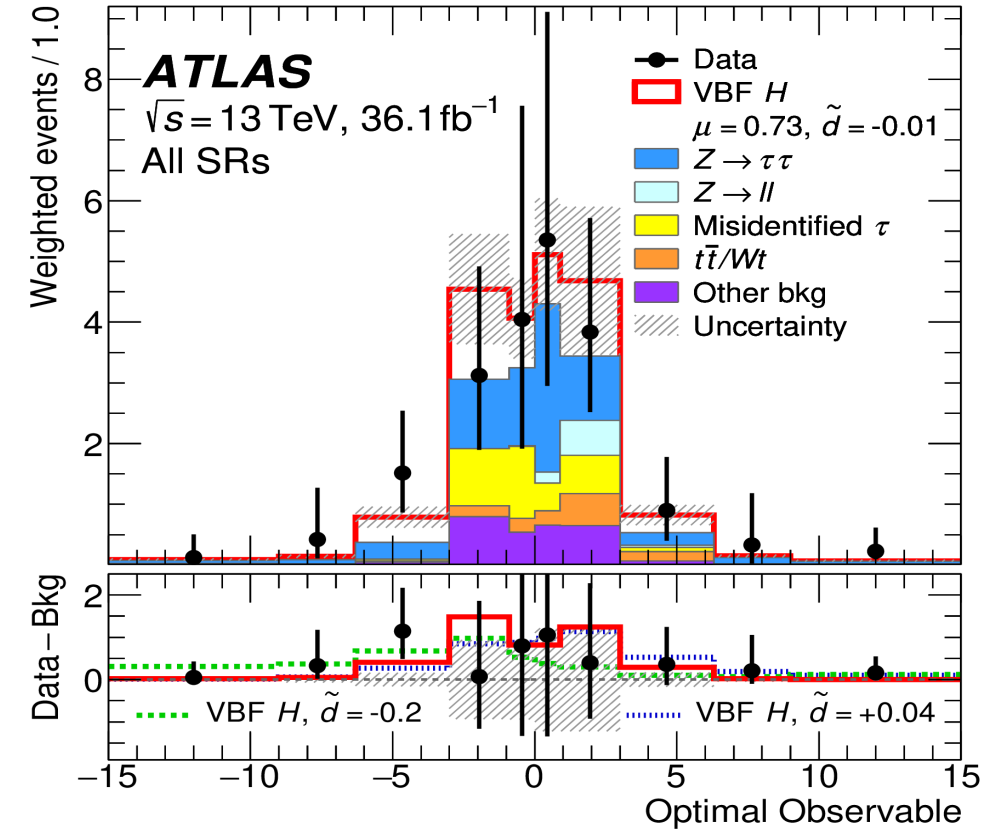
Suche nach neuen Quellen von CP-Verletzung (2)

Berechne CP-ungerade Optimale Observable (OO)
aus Viererimpulsen von H und beiden Jets



Im SM: symmetrische Verteilung, $\langle \text{OO} \rangle = 0$
 Falls CPV: asymmetrische Verteilung, $\langle \text{OO} \rangle \neq 0$

Verteilung von OO in Daten 2015+2016



Kein Hinweis auf CP-Verletzung

Grenzen auf Parameter \tilde{d}

Abschließende Bemerkungen

B.E.H.G.H.K.-Mechanismus beschreibt massive Teilchen ohne die Selbstkonsistenz der Theorie zu zerstören.
Konsequenz des Konzeptes: neues skalares Teilchen „das Higgs-Boson“

Entdeckung eines Higgs-Bosons mit Masse von 125 GeV in 2012 ein Meilenstein der Teilchenphysik
Ergebnis von Forschung von >10 000 Physiker*innen, Ingenieur*innen, Techniker*innen über > 30 Jahre

In bisherigen Messungen: Higgs-Boson sieht sehr SM-artig aus
Kopplungen mit Genauigkeit 5 bis 15% gemessen aber Abweichungen in vielen Modellen deutlich kleiner

Unsere Kenntnis heute ist deutlich größer und genauer als wir uns erträumt haben.

Unsere Hoffnung: vielleicht ist das Higgs-Boson das Teleskop zu neuer Physik (DM, BAU)?

Bisher nur 5% des gesamten LHC-Datensatzes aufgezeichnet und analysiert

Hoffentlich Überraschungen in den nächsten Jahren oder Dekaden

“Weiterführende” Literatur

BRENNPUNKT

■ **Higgs- oder nicht Higgs-Boson?**

Die Experimente ATLAS und CMS am LHC entdecken ein neues Teilchen mit einer Masse von 126 GeV/c²

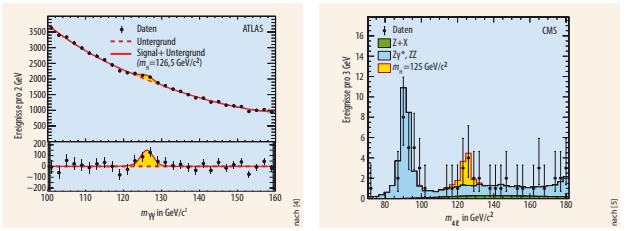
Vor fast 50 Jahren formulierten die sechs Theoretiker Englert, Brout, Higgs, Guralnik, Hagen und Kibble einen später nach ihnen benannten Mechanismus, mit dem es erstmals gelang, massebehaftete Elementarteilchen im Rahmen von lokalen Eichtheorien konsistent zu beschreiben [1]. Diese Theorien beschreiben sehr erfolgreich die Kräfte des Mikrokosmos: die elektromagnetische, die starke und die schwache Wechselwirkung, die von verschiedenen Austausch- oder Kraftteilchen mit Spin = 1 übertragen werden. Allerdings verbieten Eichtheorien zunächst massive Kraftteilchen, während Experimente zeigen, dass die Eichbosonen W⁺ und Z der schwachen Kraft eine endliche Masse haben. Im Rahmen des häufig allein nach Peter Higgs bezeichneten Mechanismus entstehen die Massen der Kraftteilchen sowie der Fermionen durch deren Wechselwirkung mit dem omnipräsenten Kondensat eines neu eingeführten Feldes mit Spin = 0. Dies ist das erste elementare Skalarfeld in der Theorie der Elementarteilchen.¹⁾ In seiner minimalen Version sagt der Higgs-Mechanismus die Existenz eines neuen neutralen, CP-geraden, skalaren Teilchens voraus: das Higgs-Boson. Die Suche nach diesem letzten Baustein des Standardmodells der Teilchenphysik ist seit mehreren Dekaden eine der zentralen Aufgaben der Teilchenphysik an Beschleunigern. Im Rahmen des Standardmodells ist die Masse des Higgs-


Bosons der einzige freie Parameter, der alle seine Eigenschaften bestimmt, insbesondere die Kopplungsstärken an alle Teilchen, die jeweils proportional zur Masse des betrachteten Teilchens sind, und damit alle Produktionsraten und Zerfallswahrscheinlichkeiten. Vor dem Beginn der Datennahme am Large Hadron Collider (LHC) am CERN gelang es, am e⁺e⁻-Beschleuniger LEP den Massenbereich unterhalb von 114,4 GeV/c² und am Proton-Antiproton-Beschleuniger Tevatron ein kleines Massenfenster um 160 GeV/c² auszuschließen [2]. Indirekt ergeben Präzisionsmessungen eine obere Grenze für die Masse des Higgs-Bosons von 152 GeV/c² [3]. Seit März 2010 liefert der LHC Proton-Proton-Kollisionen bei bisher unerreichten Schwerpunktsenergien von 7 TeV (bis 2011) bzw. 8 TeV (ab 2012). Die LHC-Experimente wurden darauf ausgelegt, den gesamten in Frage kommenden Massenbereich abzudecken und somit die Existenz des Higgs-Bosons entweder nachzuweisen oder auszuschließen. Nachdem bereits im Dezember 2011 erste vage Hinweise auf ein neues Teilchen mit einer Masse von etwa 125 GeV/c² gefunden wurden, haben am 4. Juli schließlich die ATLAS- und CMS-Experimente ihre neuen Ergebnisse öffentlich vorgestellt.²⁾ Während der bisherigen Laufzeit des LHC sollten bei insgesamt rund 10¹⁵ stattgefundenen Kollisionen etwa 200 000 Higgs-Bosonen entstan-

den sein, vorausgesetzt ihre Masse beträgt 125 GeV/c². Das Higgs-Boson zerfällt bei dieser Masse nach im Mittel 10⁻²⁵ s in die unterschiedlichen Teilchen. Dabei weisen die Zerfälle in zwei Photonen (H → γγ) oder in zwei Z-Bosonen (H → ZZ), die in jeweils ein Leptonenpaar (Myonen oder Elektronen) weiter zerfallen (Z → ℓℓ), das größte Entdeckungspotenzial auf. Die entsprechenden Zerfallswahrscheinlichkeiten sind zwar sehr klein – ca. 0,2 % für H → γγ bzw. 0,013 % für H → ZZ → 4ℓ –, sie bieten jedoch den Vorteil, dass sich die invariante Masse der Zerfallsprodukte mit hoher Präzision rekonstruieren lässt und die Untergrundprozesse kontrollierbar sind. Ein neues Teilchen zeigt sich dann als Überhöhung im Massenspektrum gegenüber Untergrundprozessen. Beim ebenfalls wichtigen Zerfall in zwei W-Bosonen (H → W⁺W⁻) lässt sich die Masse nicht mit guter Auflösung rekonstruieren, da die W-Bosonen in jeweils ein Lepton und ein nicht nachweisbares Neutrino weiter zerfallen. Die bei niedrigen Massen dominierenden Zerfälle in Fermionen (b-Quarks und Tau-Leptonen) sind wegen der enorm hohen Rate an Untergrundprozessen und der begrenzten Massenauflösung schwierig nachzuweisen. Sowohl für ATLAS als auch für CMS zeigen die beobachteten Massenspektren im Endzustand zweier Photonen bzw. Z-Bosonen jeweils eine Ansammlung von Ereignissen bei rund 126 GeV/c²,

¹⁾ Felder mit nicht verschwindendem Spin dürfen kein Kondensat bilden, da sonst die Isotropie des Raumes verletzt würde.
²⁾ www.youthb.com/user/CERN-TV

Abb. 1 Sowohl bei ATLAS (links) als auch bei CMS (rechts) weisen die Spektren invariante Massen ein Signal bei rund 126 GeV/c² auf. Für ATLAS ist das Spektrum zweier Photonen, für CMS das vierer Leptonen aus dem Zerfall zweier Z-Bosonen gezeigt.






Contents lists available at SciVerse ScienceDirect

Progress in Particle and Nuclear Physics

journal homepage: www.elsevier.com/locate/ppnp




Review

The Higgs boson in the Standard Model—From LEP to LHC: Expectations, Searches, and Discovery of a Candidate

S. Dittmaier*, M. Schumacher

Physikalisches Institut, Albert-Ludwigs-Universität Freiburg, Hermann-Herder-Strasse 3, 79104 Freiburg im Breisgau, Germany



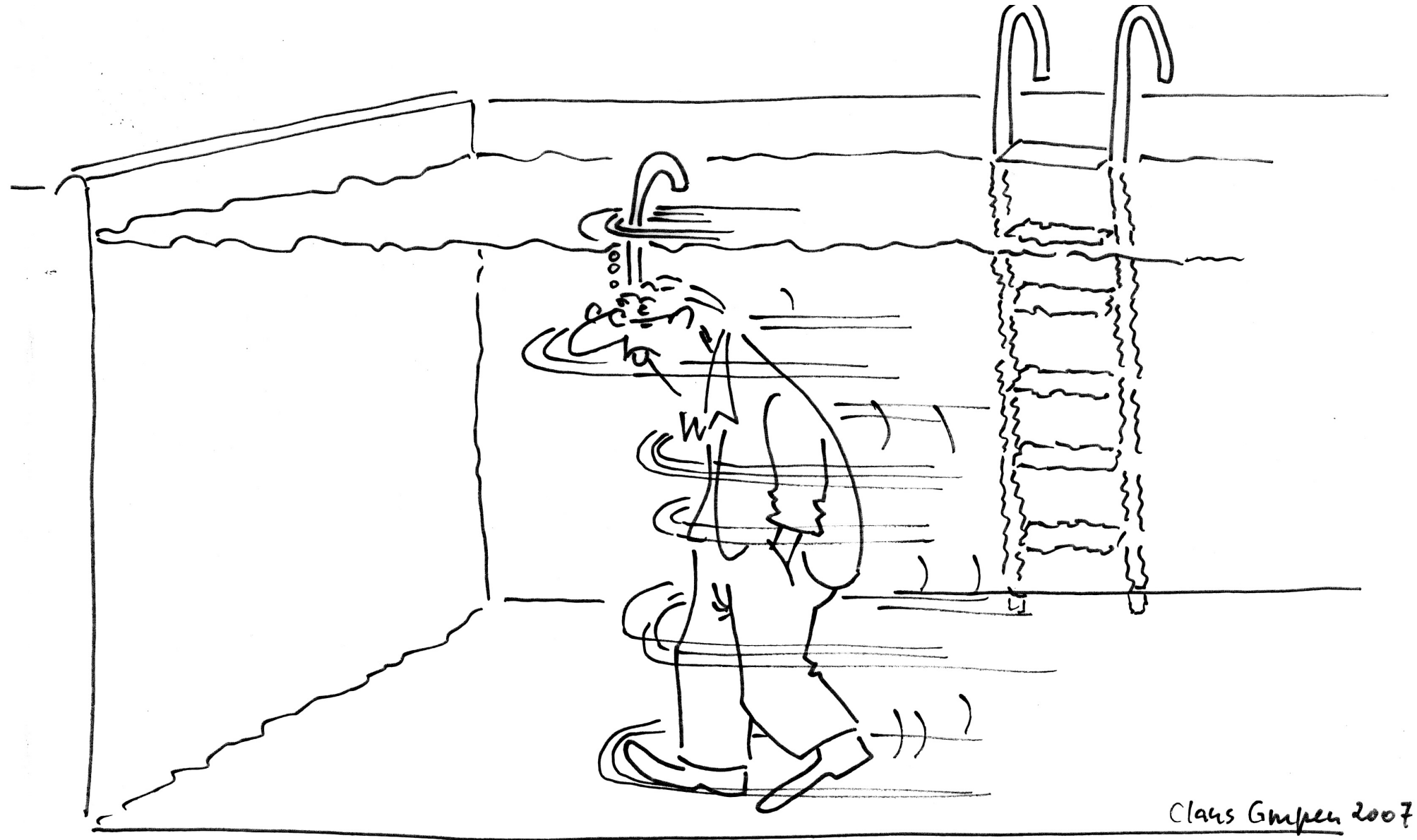
ARTICLE INFO

Keywords:
Collider physics
Electroweak interactions
Higgs boson
Searches at LEP, Tevatron and LHC

ABSTRACT

The quest for the Higgs boson of the Standard Model, which was a cornerstone in the physics programme at particle colliders operating at the energy frontier for several decades, is the subject of this review. After reviewing the formulation of electroweak symmetry breaking via the Higgs mechanism within the Standard Model, the phenomenology of the Higgs boson at colliders and the theoretical and phenomenological constraints on the Standard Model Higgs sector are discussed. General remarks on experimental searches and the methodology of statistical interpretation are followed by a description of the phenomenology of Higgs-boson production and the corresponding precise predictions. The strategies of the experimental searches and their findings are discussed for the Large Electron Positron Collider (LEP) at CERN, the proton-antiproton collider Tevatron at Fermilab, and the proton-proton Large Hadron Collider (LHC) at CERN. The article concludes with the description of the observation of a Higgs-like boson at the LHC.

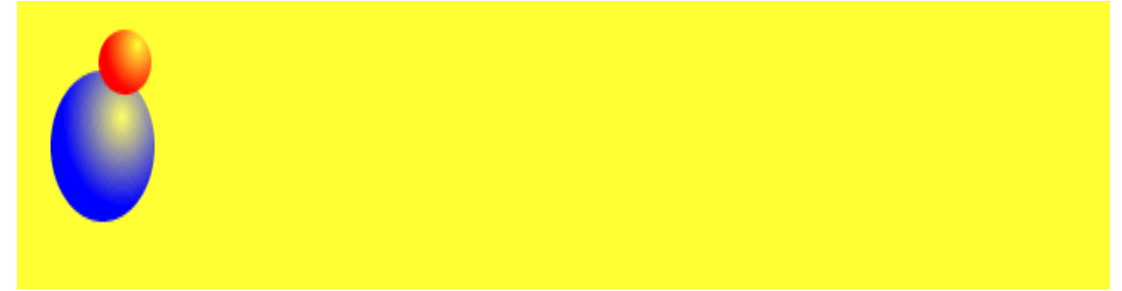
© 2013 Elsevier B.V. All rights reserved.



„Anschauliche“ Erklärung der Massenerzeugung

Leeres Vakuum

Alle Teilchen sind masselos und bewegen sich mit derselben Geschwindigkeit, der Lichtgeschwindigkeit.



Higgs-Hintergrundfeld

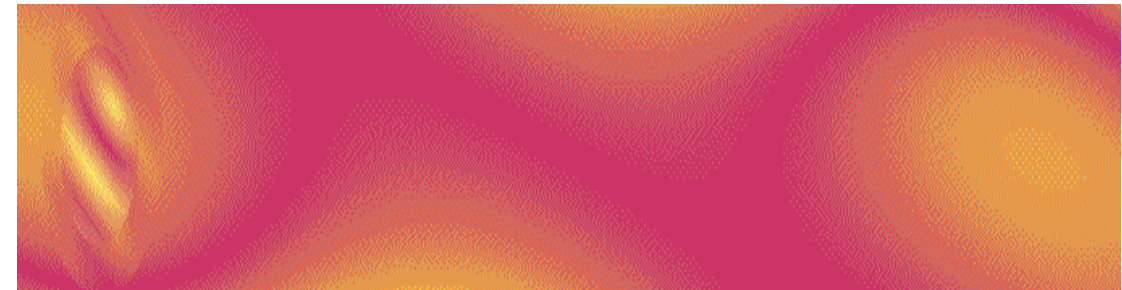
Teilchen wechselwirken mit dem Higgs-Hintergrundfeld und werden dadurch verlangsamt. Sie erhalten effektiv eine Masse. Die Masse hängt von der Stärke der Wechselwirkung mit dem Hintergrundfeld ab.



Der Preis: das Higgs-Teilchen

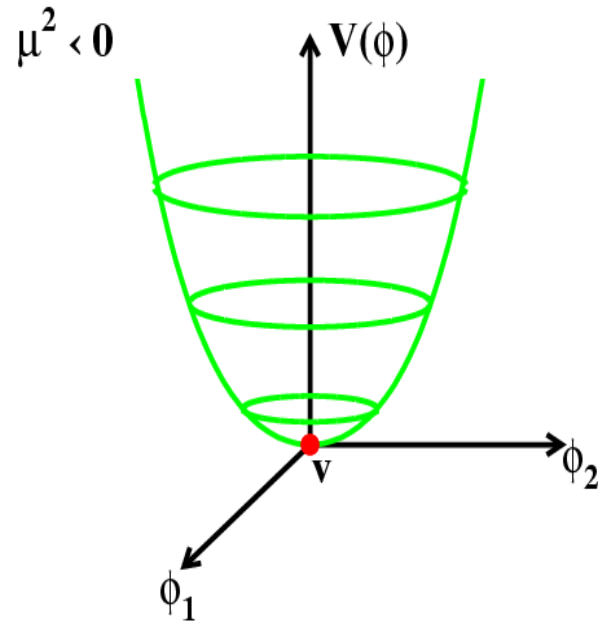
Eine quantenmechanische Anregung des Higgsfeldes

Eine notwendige Konsequenz dieses Konzepts !



Elektroschwacher Phasenübergang / Spontane Symmetriebrechung

Frühes Universum



$$V = -\mu^2 \frac{|\phi+\phi|}{|\phi+\phi|^2} + \lambda$$

10^{-12} s nach

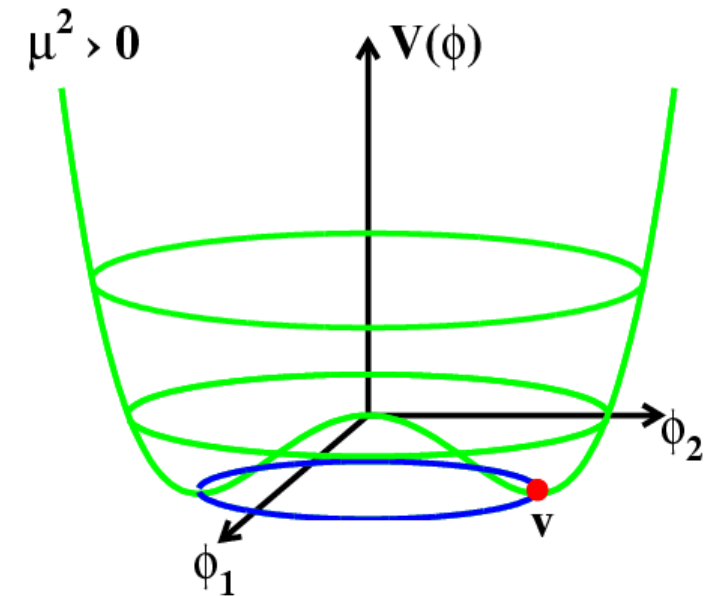
dem Urknall



Elektroschwacher
Phasenübergang

- Vakuumerwartungswert = 0
- Symmetrie ungebrochen
- Eichbosonen u. Diracfermionen sind masselos und bewegen sich mit Lichtgeschwindigkeit c

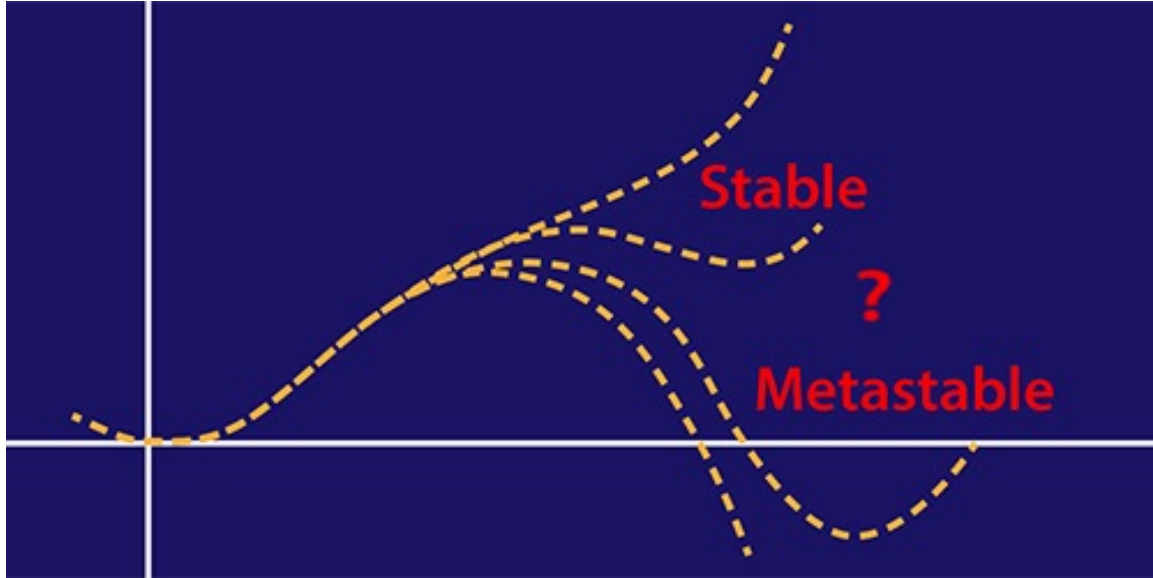
Heute



- Vakuumerwartungswert nicht 0
- Symmetrie gebrochen
- Eichbosonen u. Diracfermionen sind massiv und bewegen sich mit Geschwindigkeit $v < c$

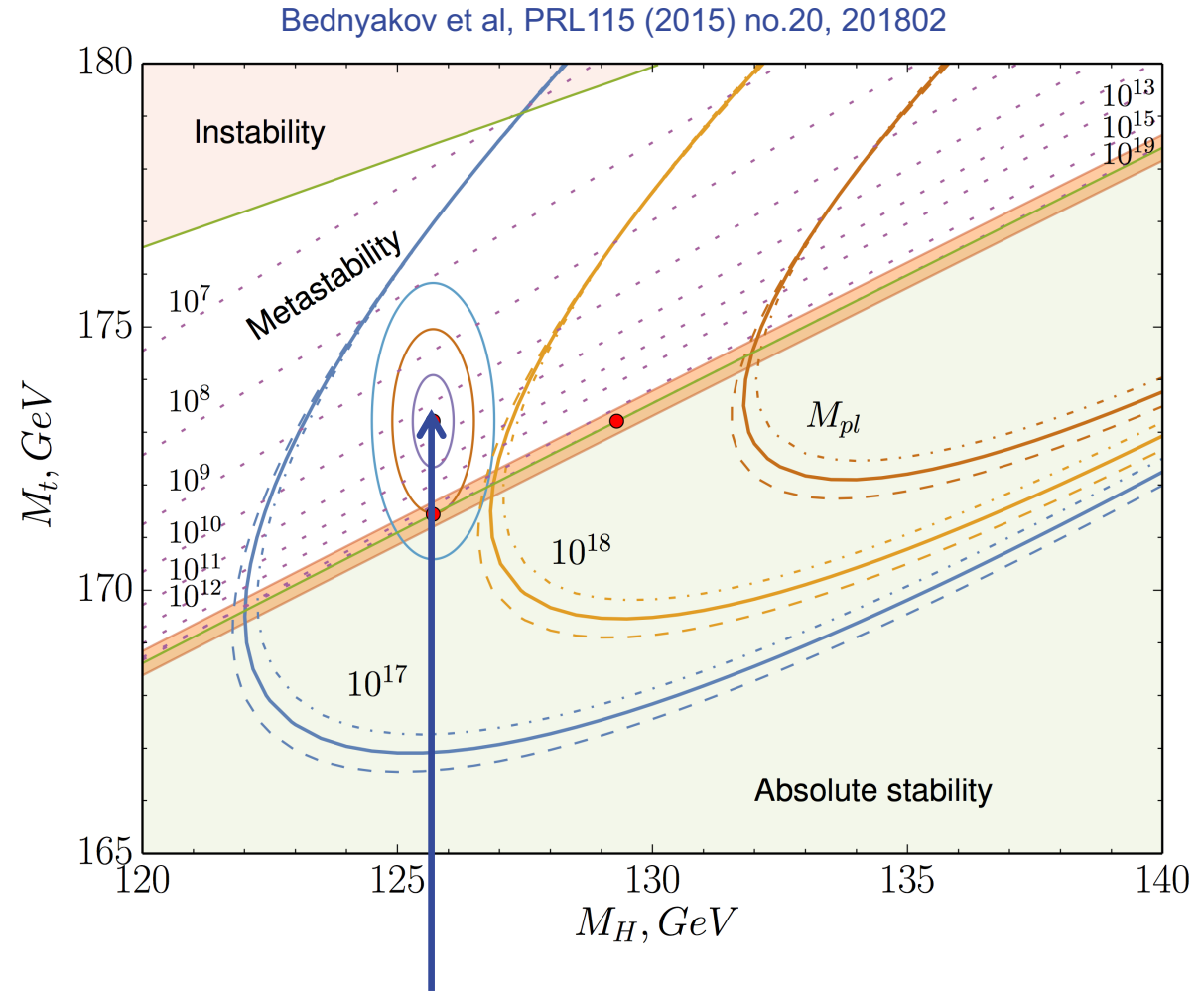
Higgs-Boson-Masse und Stabilität des Universums

Stabilität des elektroschwachen Vakuums



Werte-Paare von M_{top} und M_{H} bestimmen ob
Vakuum, stabil, metastabil und instabil ist

Derzeitige Messwerte 2- σ weg von Stabilitätsgrenze
Aber Wahrscheinlichkeit für "Tunneln" ins "wahre"
Vakuum klein im Vergleich zu Alter des Universums

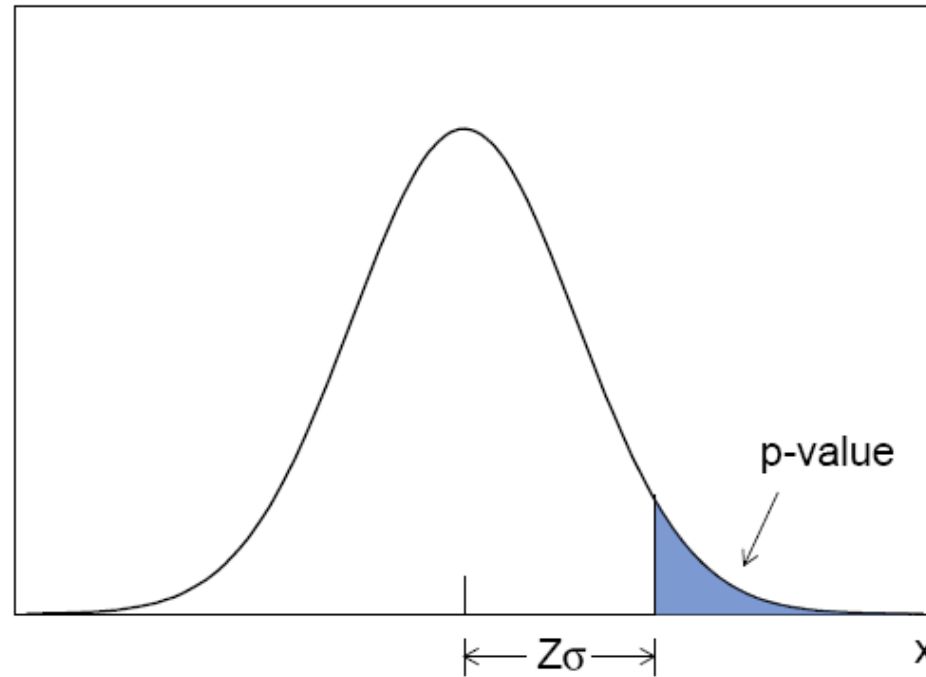
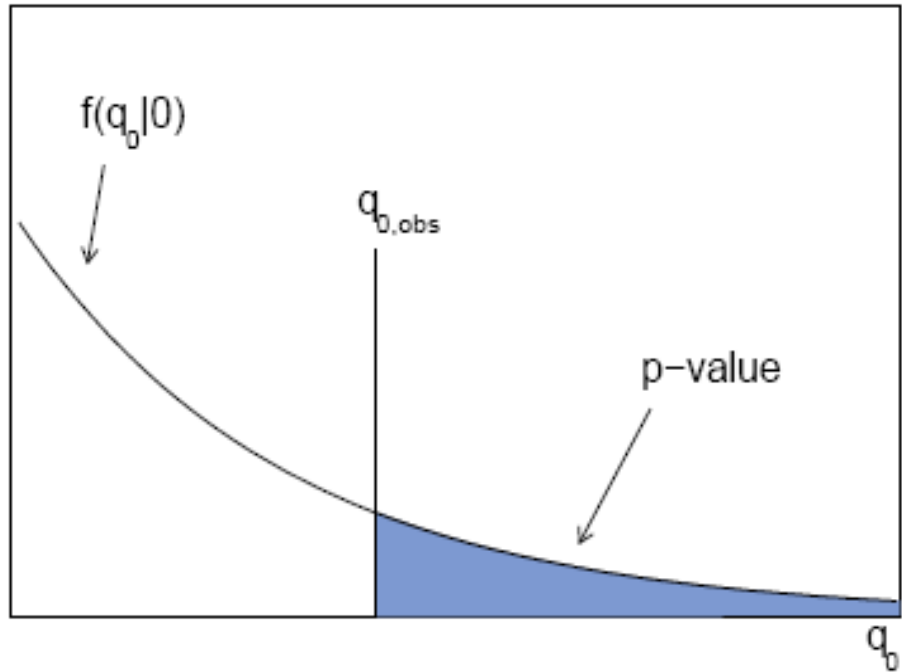


$$M_{\text{H}} = 125.09 \pm 0.24 \text{ GeV}$$

Genauere Messung von M_{top} wichtiger

p-Wert und Signifikanz

q_0 optimale Teststatistik zur Prüfung der Hypothese, ob es nur Untergrund in Daten gibt
Konstruiert aus erwarteten Signal- und Untergrundereignissen in „gebinnten“ Verteilungen von Masse, etc
 $f(q_0|0)$: Wahrscheinlichkeitsverteilung für q_0 für die Nur-Untergrund-Hypothese „0“
 $q_{0,obs}$ beobachteter Wert \rightarrow Berechnung des p-Wertes



$$p = \int_Z^{\infty} \frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{-x^2/2} dx = 1 - \Phi(Z)$$

$$Z = \Phi^{-1}(1 - p)$$

p-Wert übersetzt in Signifikanz Z mittels Standardgaussverteilung
Signifikanz von 5 (3) entspricht p-Wert = 2.87×10^{-7} (1.50×10^{-3})

~4400 Zerfälle via H → WW → lνlν

Signatur:

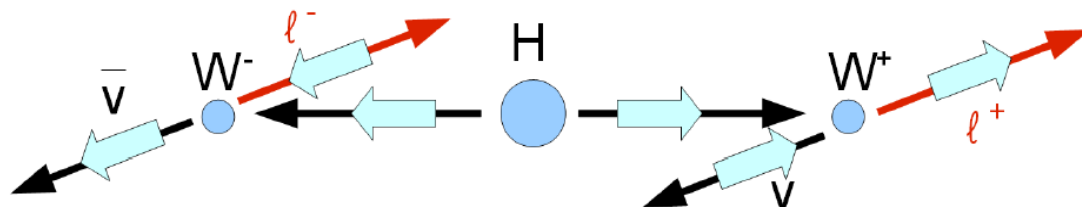
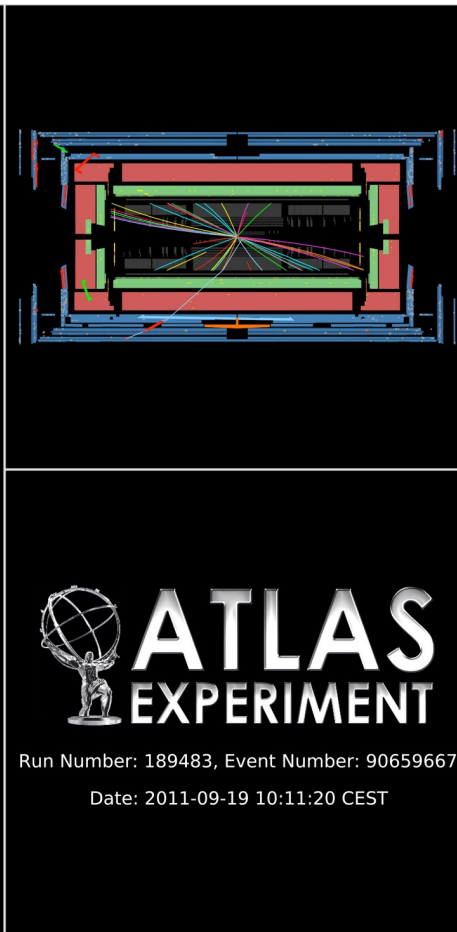
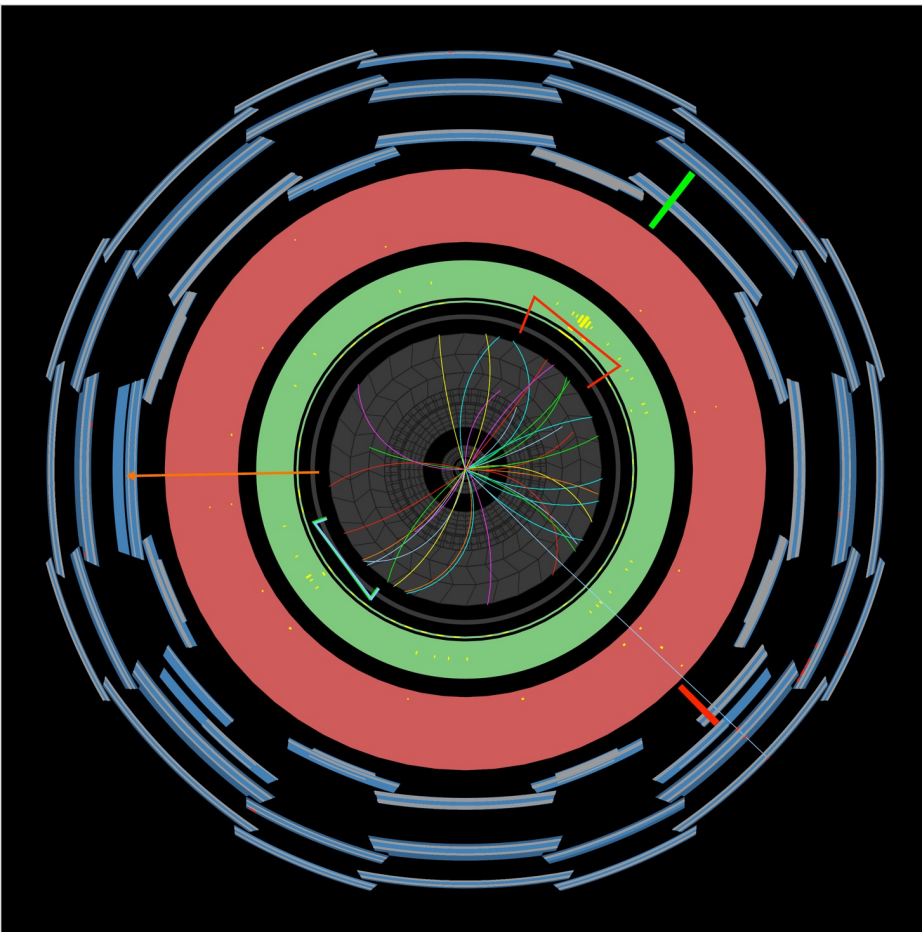
- 2 isolierte Leptonen mit kl. Öffnungswinkel
- große fehlende transversale Energie auf Grund der 2 Neutrinos

Keine Rekonstruktion von M_H möglich
 → nur transversale Masse

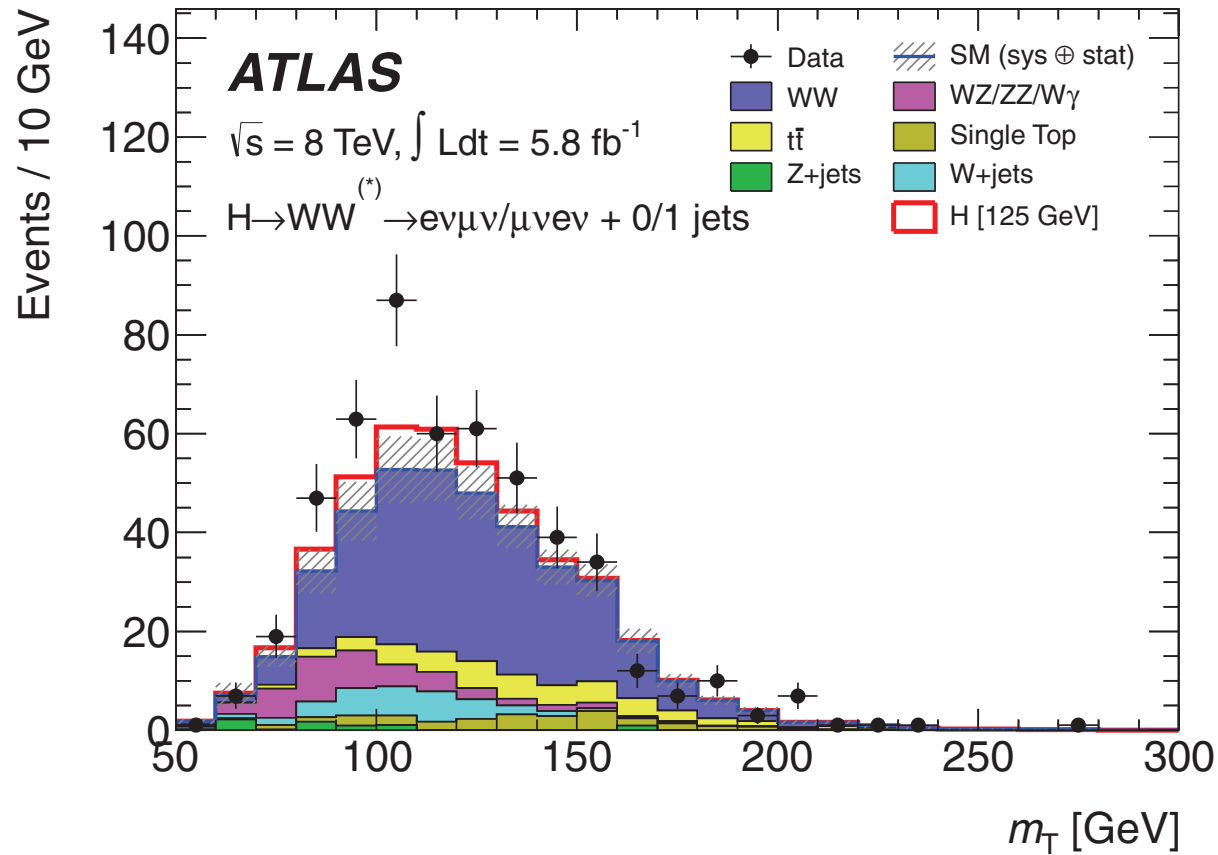
$$m_T = \sqrt{2 P_T^{\ell\ell} E_T (1 - \cos \Delta\varphi)}$$

Sehr komplexe Analyse

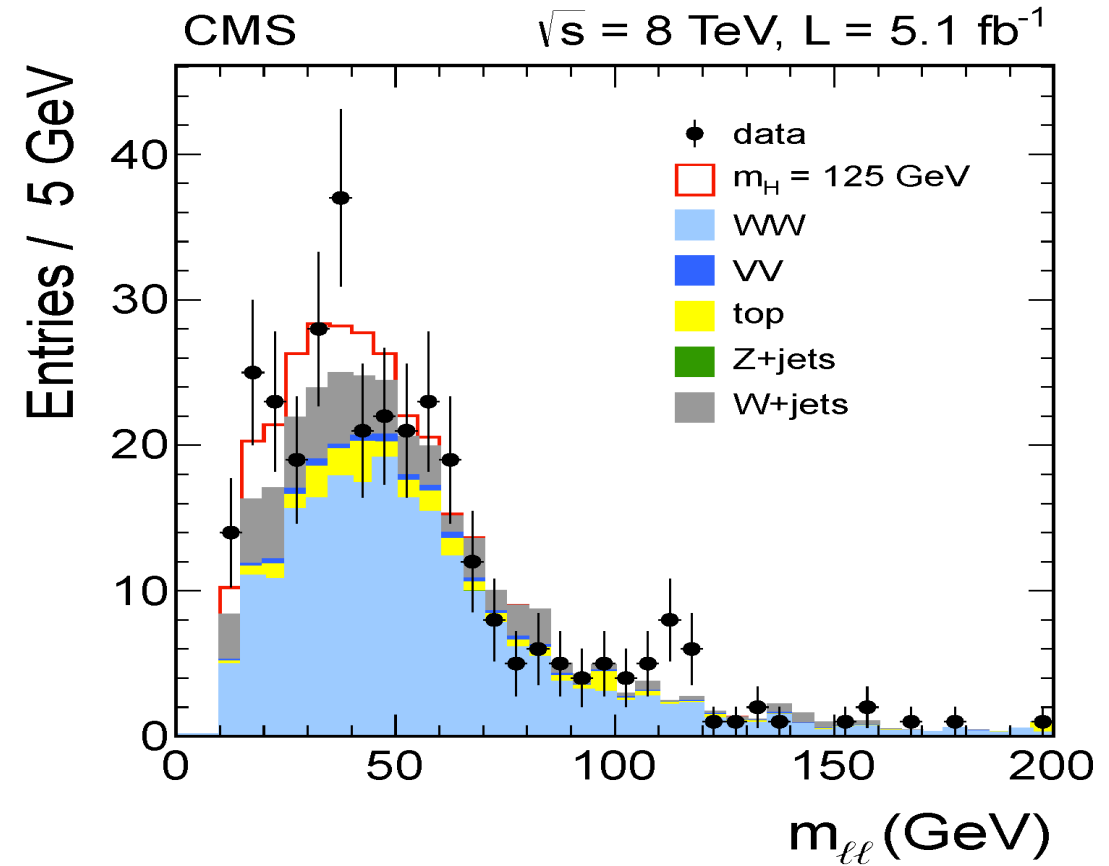
Bestimmung des Untergrundes schwierig



H → WW → lνlν: Spektren der transversalen Masse



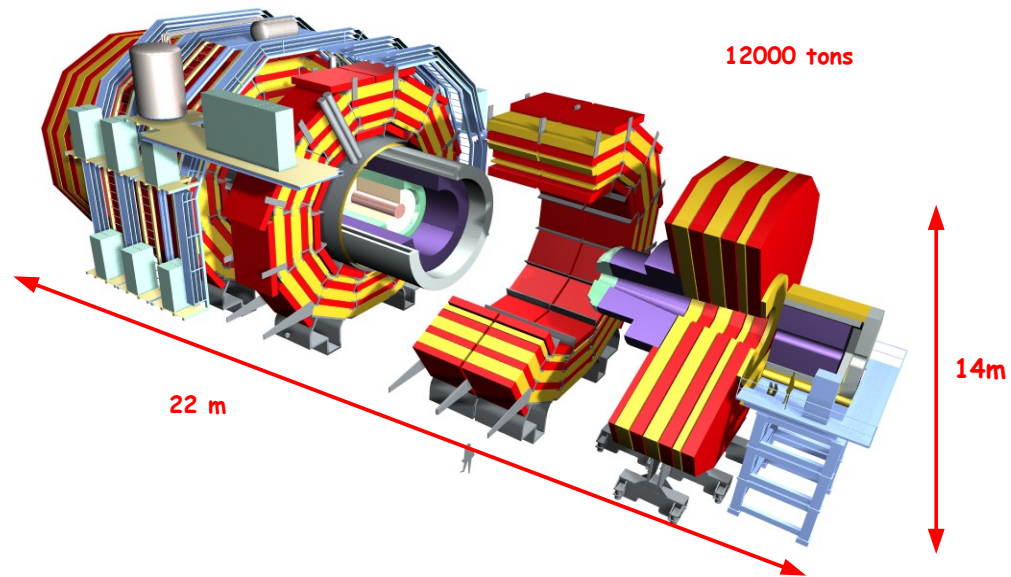
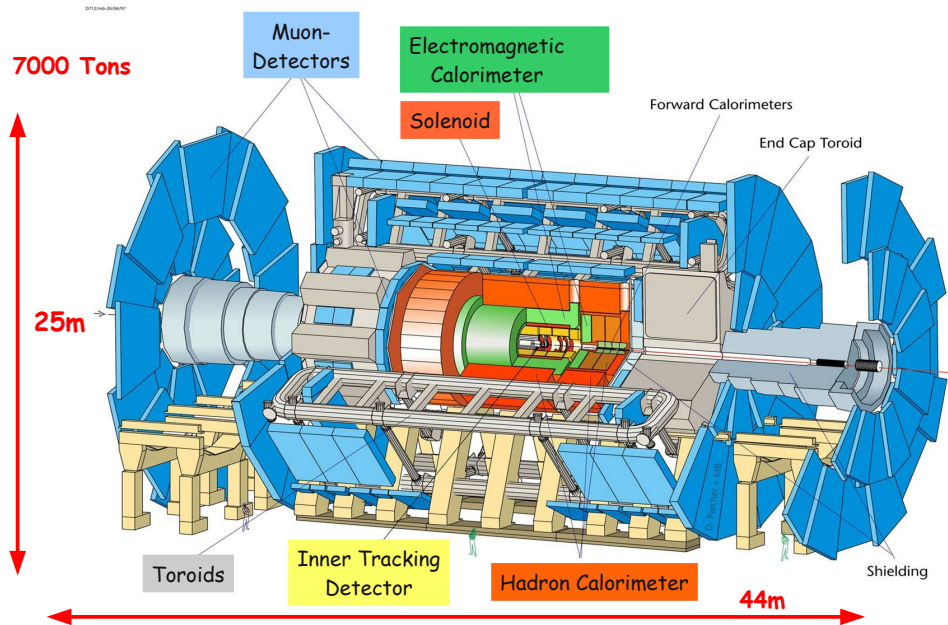
Signifikanz 2.8 (2.3 erw.)



Signifikanz: 1.6 (2.4 erw.)

Breiter Überschuss in beiden Experimenten beobachtet

ATLAS- und CMS-Experimente im Vergleich



TRACKER	$B=2T$ $\sigma/p_T \sim 5 \times 10^{-4} p_T \oplus 0.01$	$B=4T$ $\sigma/p_T \sim 1.5 \times 10^{-4} p_T \oplus 0.005$
EM CALO	$\sigma/E \sim 10\%/\sqrt{E}$ uniform longitudinal segmentation	$\sigma/E \sim 2-5\%/\sqrt{E}$ no longitudinal segm.
HAD CALO	$\sigma/E \sim 50\%/\sqrt{E} \oplus 0.03$	$\sigma/E \sim 100\%/\sqrt{E} \oplus 0.05$
MUON	Air $\rightarrow \sigma/p_T \sim 7\%$ at 1 TeV standalone	Fe $\rightarrow \sigma/p_T \sim 5\%$ at 1 TeV combining with tracker