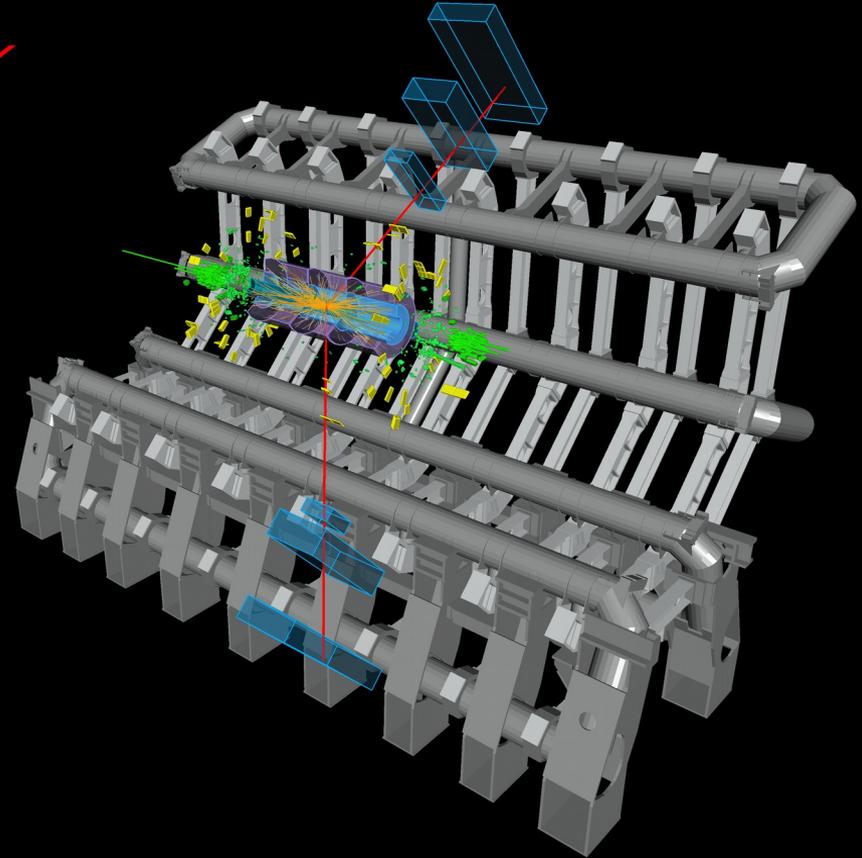
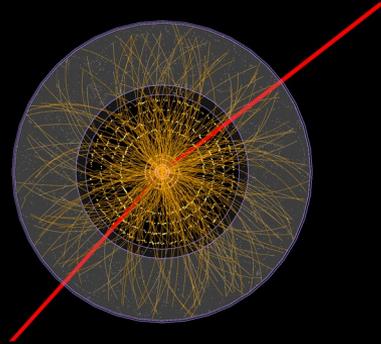


Ergebnisse vom LHC - Standardmodell und Higgs

PD Dr. Jeanette Lorenz
(Fraunhofer IKS
& LMU München)

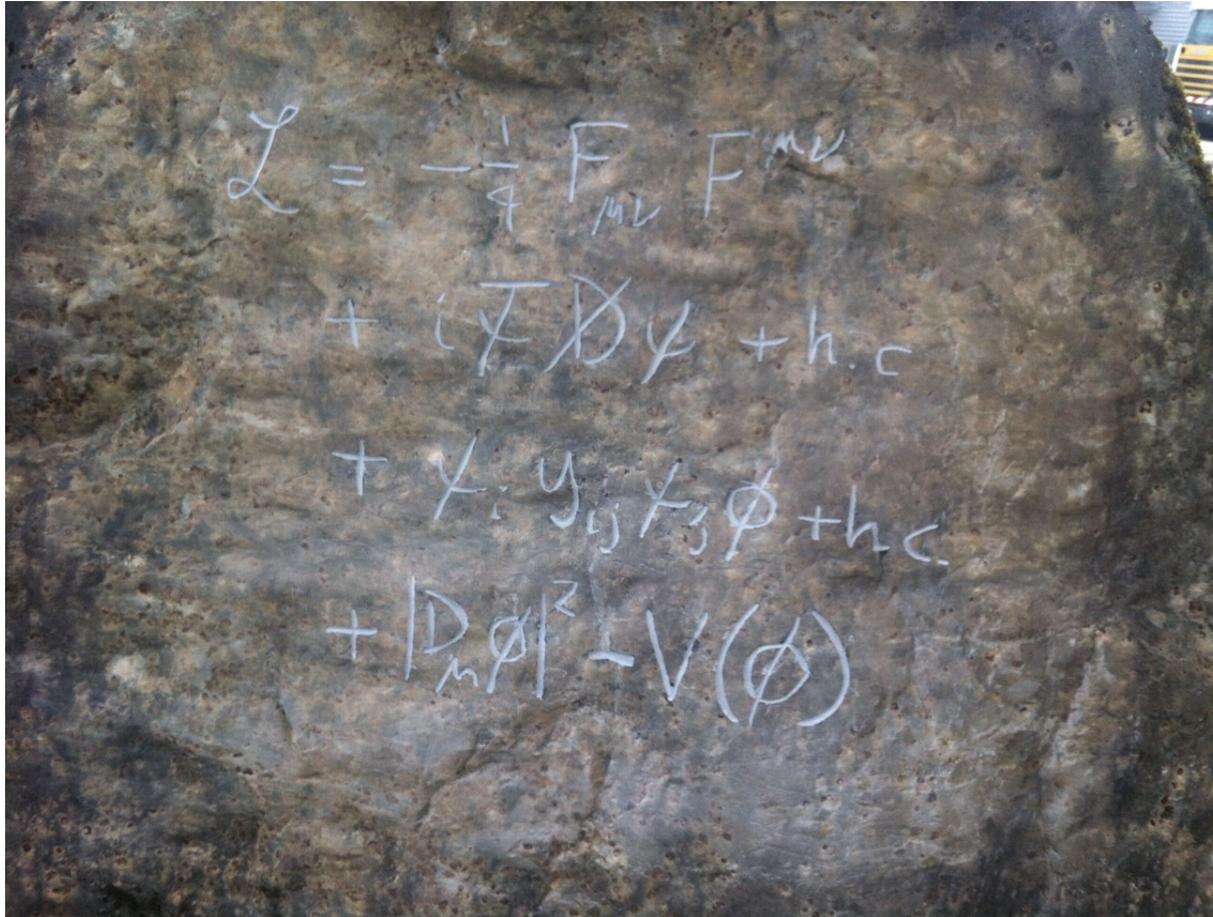


Maria-Laach Herbstschule 2021,
02.08.2021



Run: 267638
Event: 242090708
2015-06-14 01:01:14 CEST

Das Standardmodell der Teilchenphysik

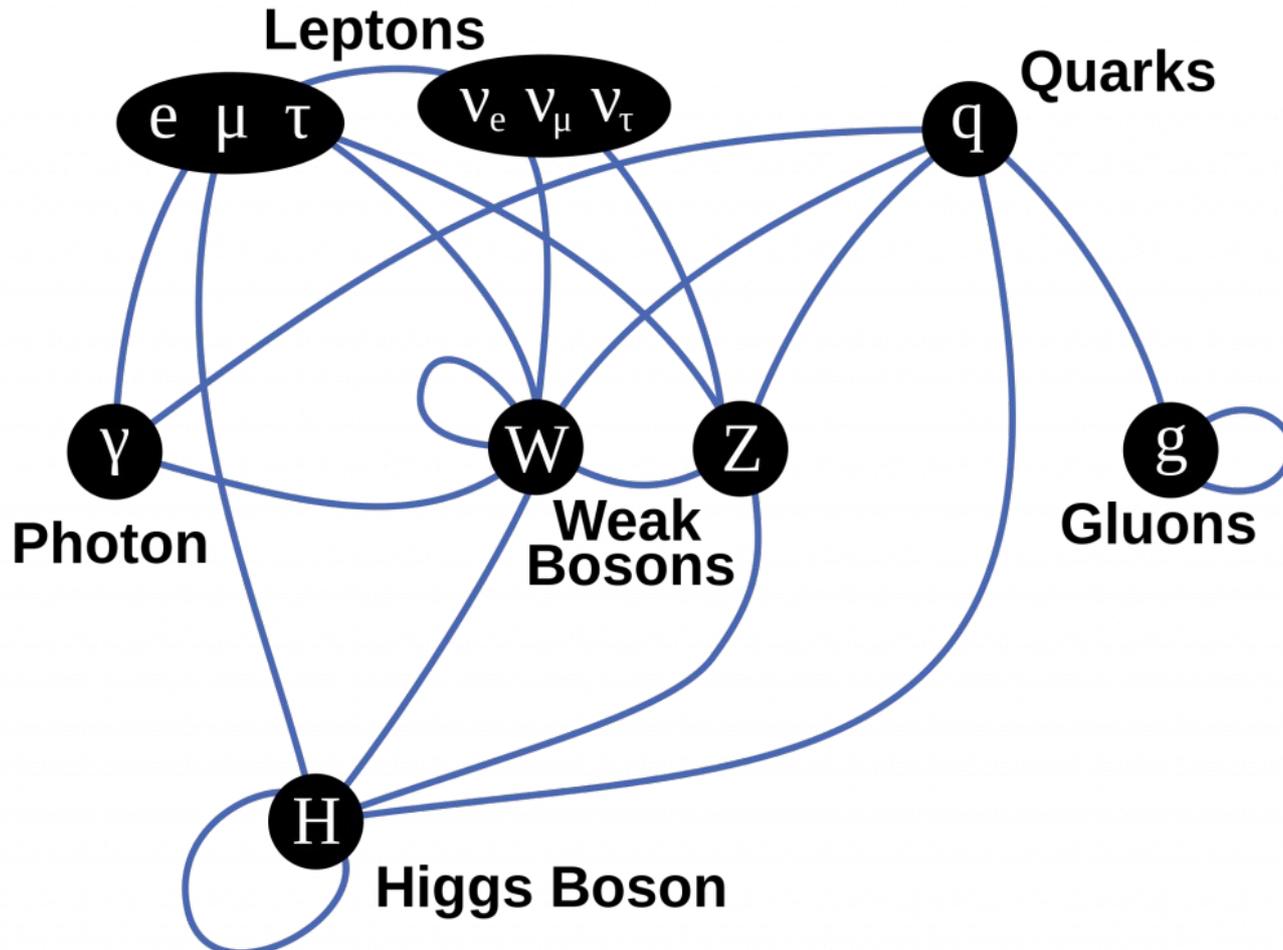


The image shows the Lagrangian of the Standard Model of particle physics, handwritten in white chalk on a dark, textured rock surface. The equation is written in four lines:

$$\begin{aligned}\mathcal{L} = & -\frac{1}{4} F_{\mu\nu} F^{\mu\nu} \\ & + i\bar{\psi} \not{D} \psi + h.c. \\ & + \bar{\chi}_i y_{ij} \chi_j \phi + h.c. \\ & + |D_\mu \phi|^2 - V(\phi)\end{aligned}$$

Der Lagrangian des Standardmodells eingraviert in einem Stein vor dem CERN Kontrollzentrum.

Teilchen und Wechselwirkungen



Am LHC:

- Präzisionsmessungen – Bestätigung des Standardmodells
- Standardmodell - Untergrund für Suchen für Physik jenseits des Standardmodells (BSM-Physik)
- Suchen nach Abweichungen – z.B. EFT Fits.

Parameter im Standardmodell

Im Falle von keinen Neutrinomassen:

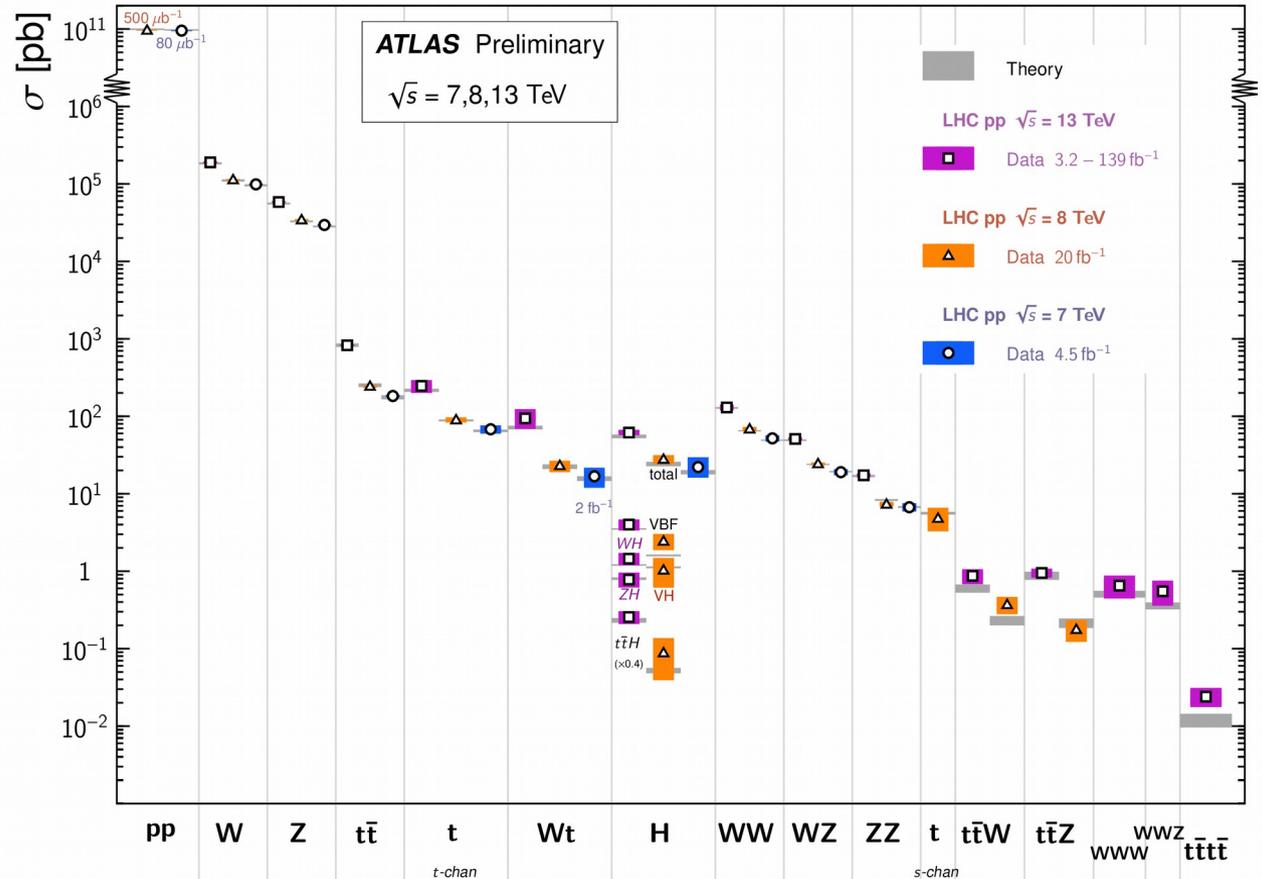
- Für jede Eichgruppe eine Kopplingskonstante: **1**
 - Higgs-Potential: **2**
 - Massen der Fermionen: **9**
 - Quark-Mischung (CKM-Matrix): **4**
 - Keine CP-Verletzung in starker Wechselwirkung: **1**
-
- 19**

Die Parameter ergeben sich nicht aus dem Standardmodell und müssen experimentell bestimmt werden.

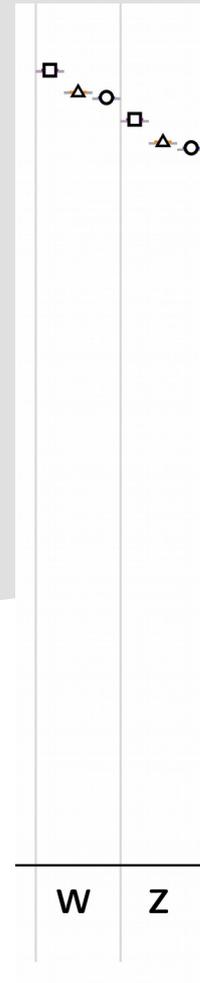
Gute Übereinstimmung der theoretischen Erwartungen mit den Messungen.

Standard Model Total Production Cross Section Measurements

Status: March 2021



Vektorbosonen



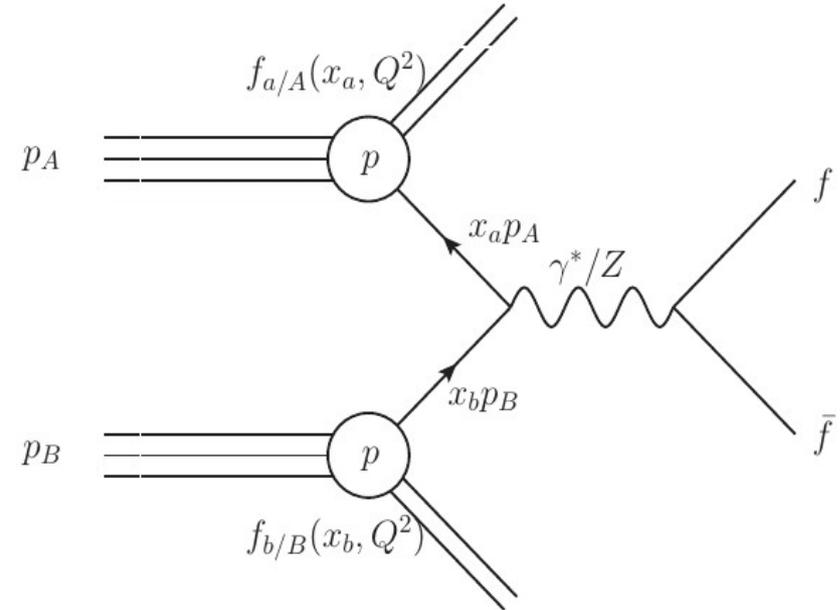
Messung des Z-Bosons als Standardkerze

[Eur.Phys.J.C 74 (2014) 2916]

Die Z und W Bosonen wurden 1983 am CERN Sp̄pS Kollider erstmals entdeckt, und genau vermessen bei LEP.

Aber auch bei LHC sehr wichtig:

- **Wiederentdeckung** → bestätigt korrekte Funktionsweise der Detektoren, und Gültigkeit des Standardmodells bei hohen Energien.
- **Messungen seltener Prozesse**, die Z oder W-Bosonen enthalten (z.B. $t\bar{t}Z$), oder in Z oder W-Bosonen zerfallen (Higgs)
- Nach Wiederentdeckung eignet sich besonders das Z-Boson gut zur **Kalibrierung** anderer Messgrößen.



Drell-Yan-Prozess

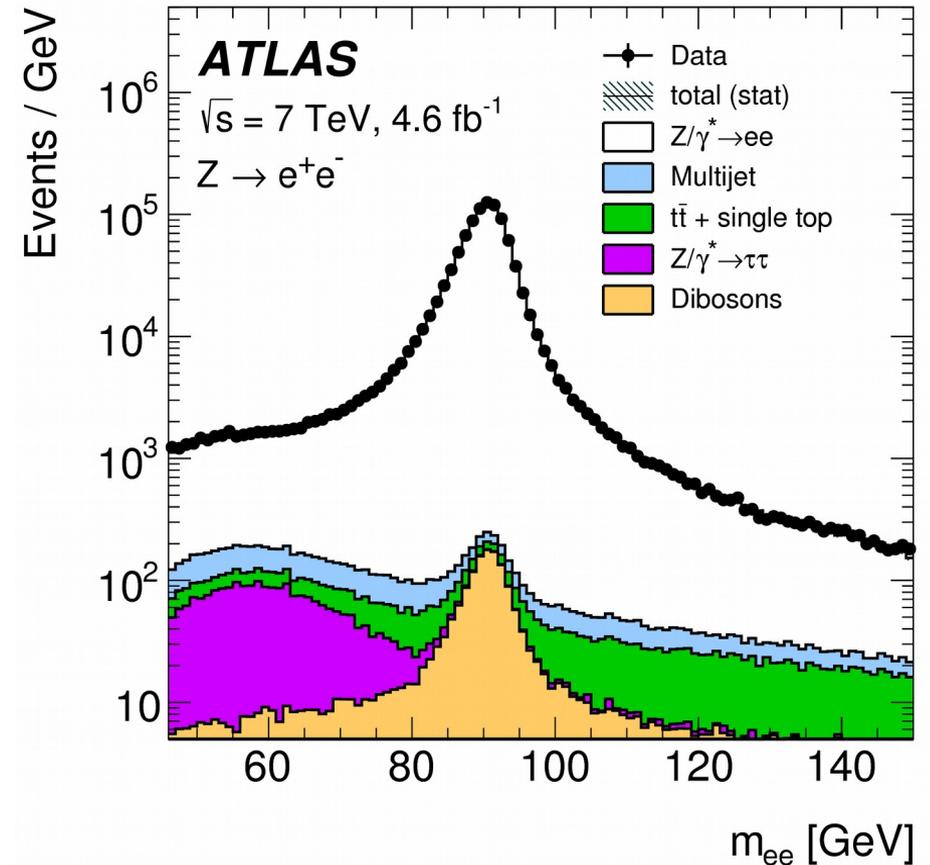
Messung des Z-Bosons als Standardkerze

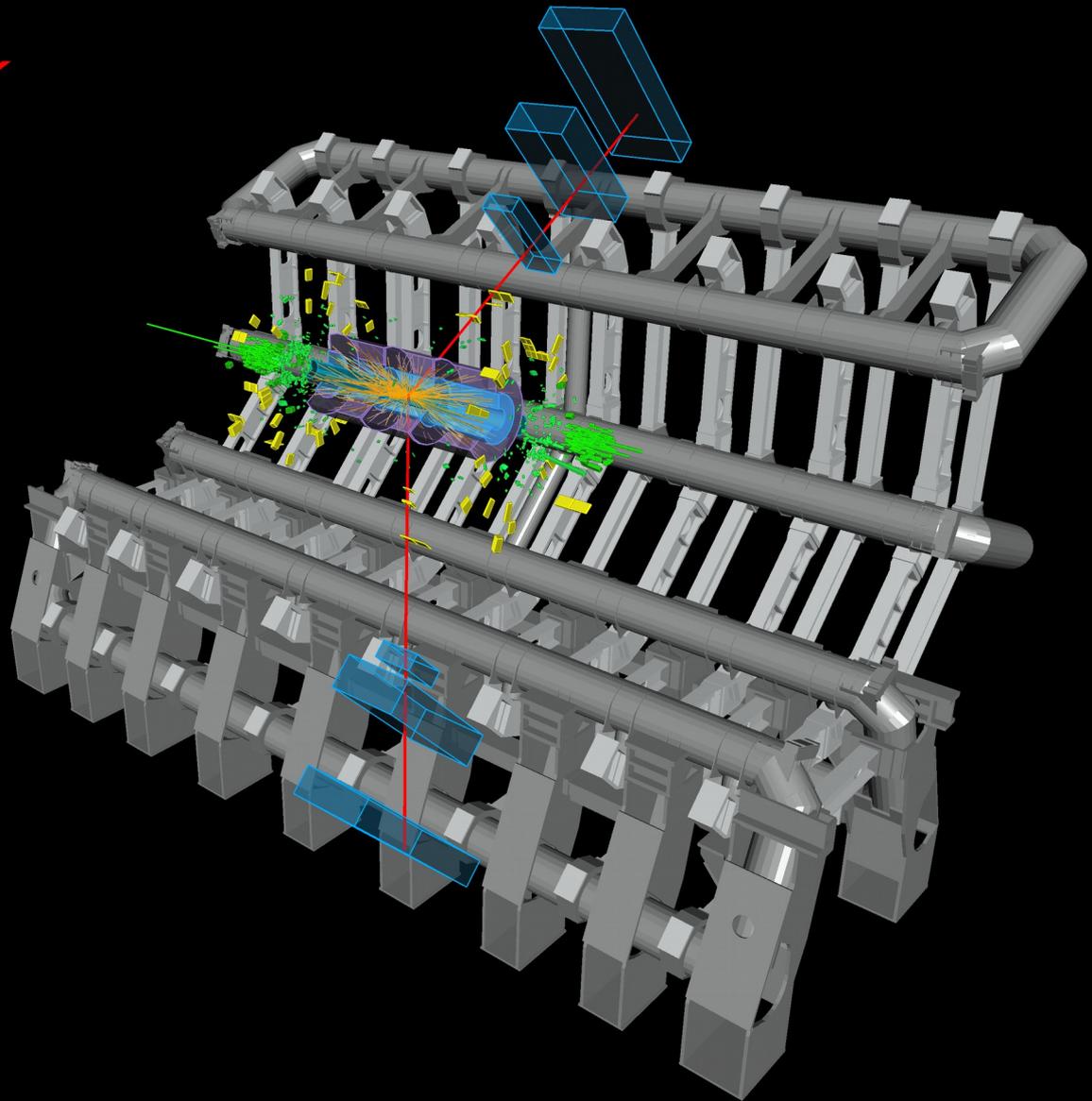
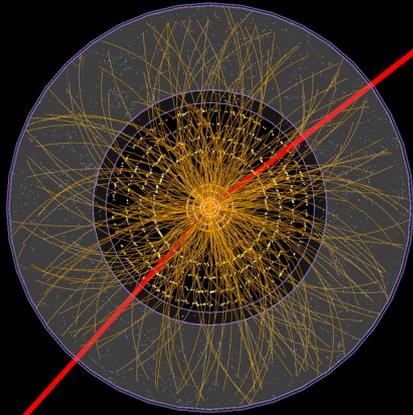
[Eur. Phys. J. C 77 (2017) 367]

Die Z und W Bosonen wurden 1983 am CERN Sp̄pS Kollider erstmals entdeckt, und genau vermessen bei LEP.

Aber auch bei LHC sehr wichtig:

- **Wiederentdeckung** → bestätigt korrekte Funktionsweise der Detektoren, und Gültigkeit des Standardmodells bei hohen Energien.
- **Messungen seltener Prozesse**, die Z oder W-Bosonen enthalten (z.B. $t\bar{t}Z$), oder in Z oder W-Bosonen zerfallen (Higgs)
- Nach Wiederentdeckung eignet sich besonders das Z-Boson gut zur **Kalibrierung** anderer Messgrößen.





ATLAS
EXPERIMENT

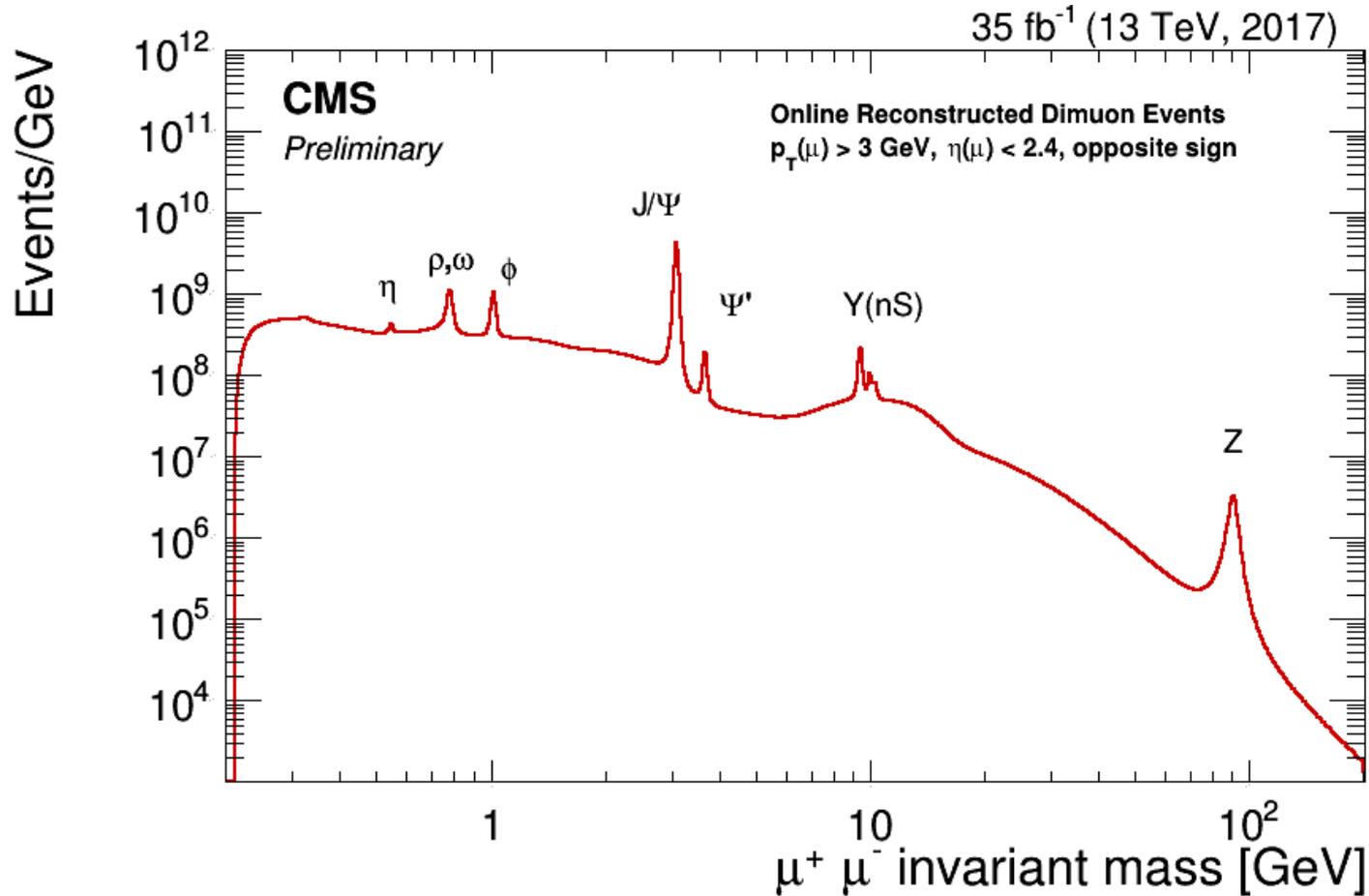
Run: 267638

Event: 242090708

2015-06-14 01:01:14 CEST

Invariante Masse von Myon-Paaren

[CMS HLT Dimuon plots]



Bedeutung des Z-Bosons für die Kalibration anderer Objekte

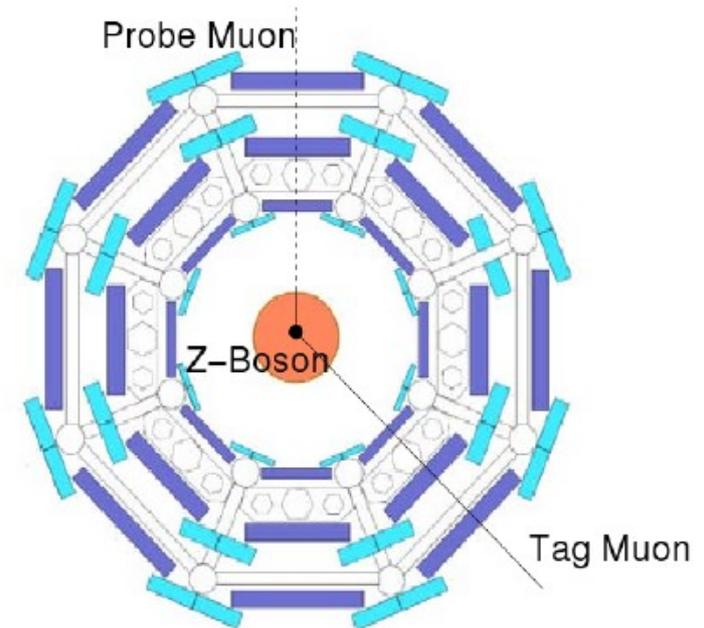
Für leptonische Z-Boson-Zerfälle (in Elektron- oder Myon-Paare) ergibt eine sehr klare Signatur im Detektor

→ Kann gut zur Kalibration anderer Objekte verwendet werden:

1. *Energie- oder Impulskalibration, indem die Energie-/Impulsskala so verschoben wird, dass das Z-Boson bei der richtigen Masse liegt.*

2. *Effizienzmessung von Leptonen (offline oder auf Trigger-Level) – mittels **Tag-and-Probe** Methode:*

- Rekonstruiere Z-Boson (Selektion zwei Lepton mit entgegengesetzter Ladung und invariante Masse konsistent mit Z-Boson-Masse)
- Verwende das eine Lepton als **Tag** (meist das Lepton ‚besserer‘ Qualität)
- Und verwende das andere als **Probe** um die gewünschte Effizienzmessung durchzuführen.



Messung der Masse des W-Bosons

[Eur. Phys. J. C 78 (2018) 110]

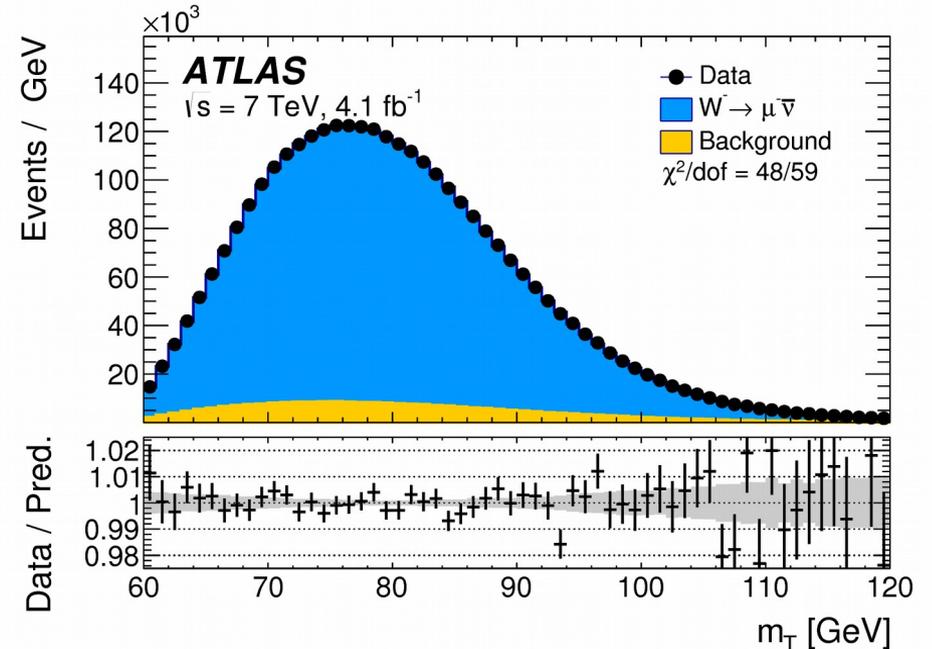
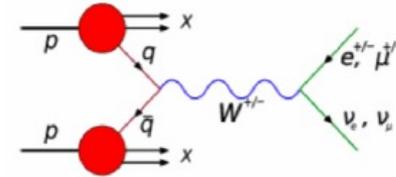
Im Gegensatz zum Z-Boson lässt sich das W-Boson nicht vollständig in leptonischen Zerfällen wegen Anwesenheit des Neutrinos rekonstruieren.

Nutze stattdessen die transversale Masse:

$$m_T = \sqrt{2p_T^\ell p_T^{\text{miss}} (1 - \cos \Delta\phi)}$$

→ Endpunkt bei der invarianten Masse m des Lepton-Neutrino-Systems.

Nutze zur Massenmessung außerdem transversalen Impuls des Leptons p_T - Jacobian Ecke bei $m/2$.



Messung der Masse des W-Bosons

Fits in transversaler Masse m_T und in transversalen Impuls p_T in unterschiedlichen Ladungs- und $|\eta_l|$ Kategorien.

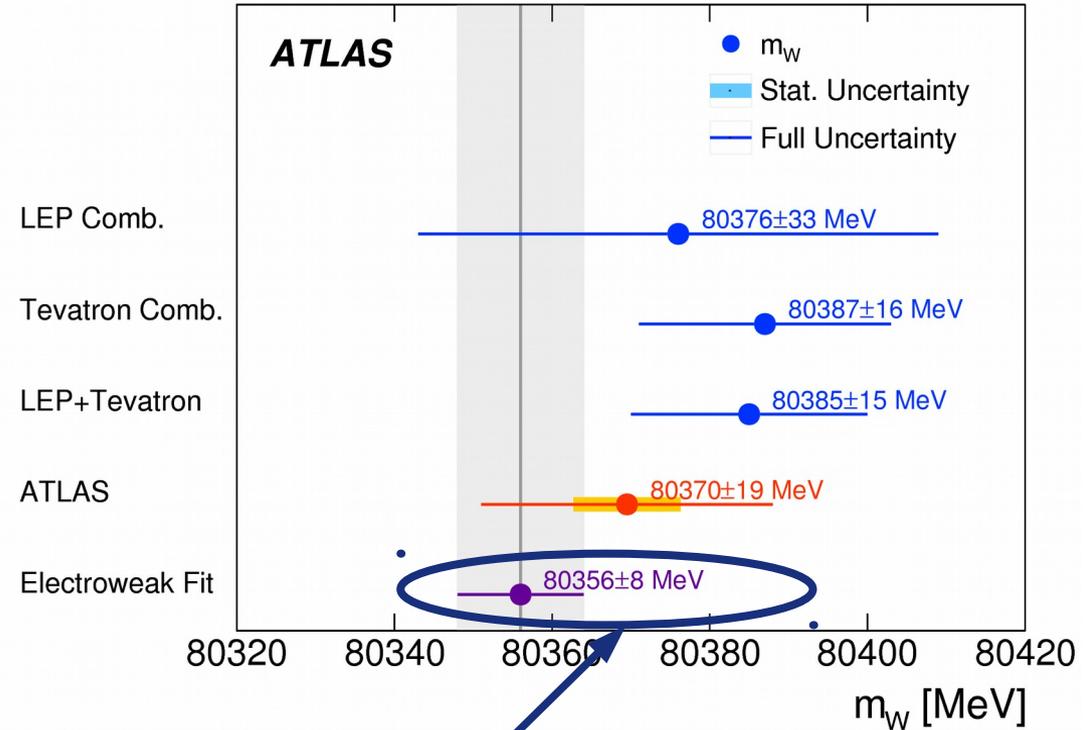
Massebestimmung mittels p_T -Fit genauer.

Kombination aller Messungen:

$$\begin{aligned} m_W &= 80369.5 \pm 6.8 \text{ MeV(stat.)} \pm 10.6 \text{ MeV(exp. syst.)} \pm 13.6 \text{ MeV(mod. syst.)} \\ &= 80369.5 \pm 18.5 \text{ MeV,} \end{aligned}$$

Dominiert von Modellierungsunsicherheiten

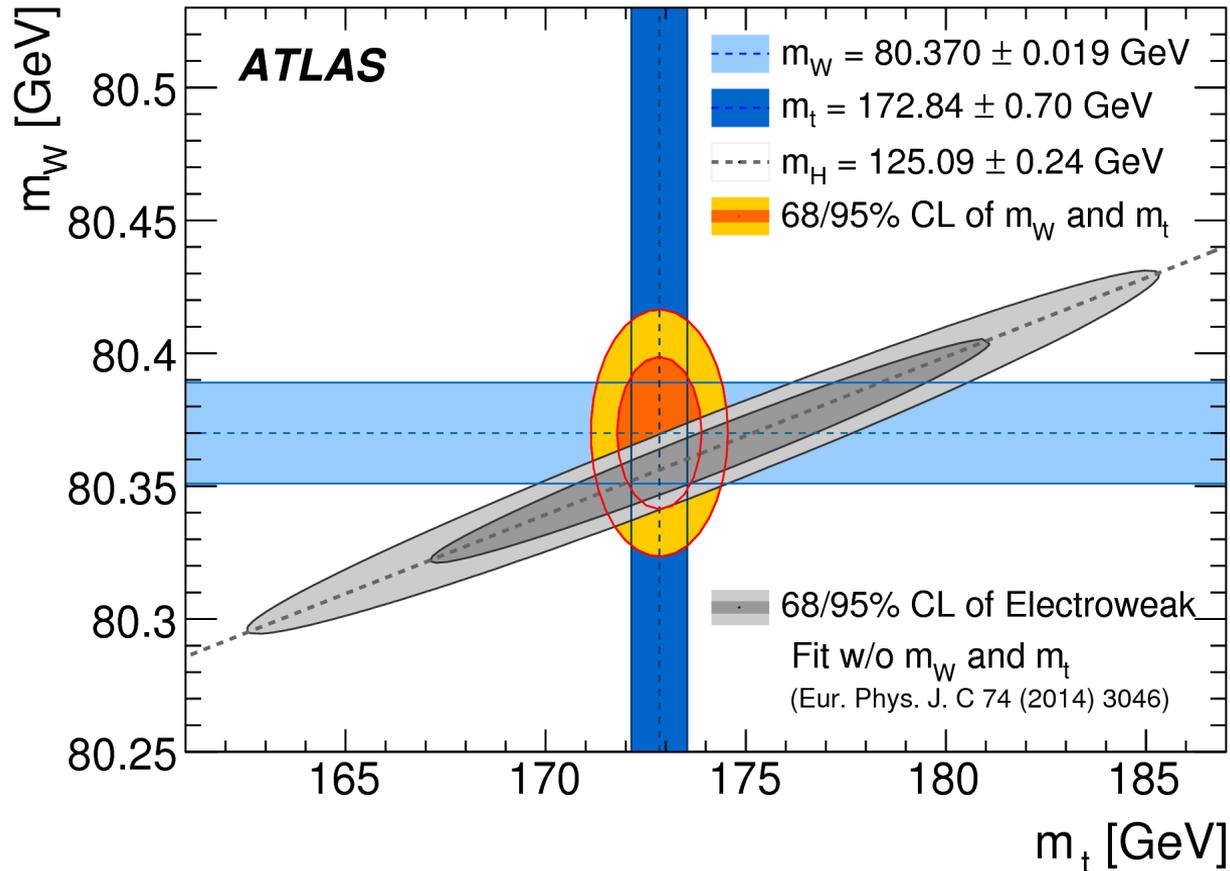
→ Genauigkeit im Bereich von CDF und D0.



Erstrebenswertes
Genauigkeit 8 MeV

Relation zwischen W-Masse, Top-Masse und Higgs-Masse

[Eur. Phys. J. C 78 (2018) 110]



In der elektroschwachen Theorie hängt die W-Masse in niedrigster Ordnung nur von der Z-Masse, g_f und der Feinstrukturkonstante α ab.

In höheren Ordnungen jedoch:

$$m_W^2 \left(1 - \frac{m_W^2}{m_Z^2} \right) = \frac{\pi\alpha}{\sqrt{2}G_\mu} (1 + \Delta r)$$

Auch Abhängigkeiten von den Eichkopplungen und den schwersten Teilchen im SM – besonders dem Top-Quark und dem Higgs-Boson.

Globaler Fit kann die Konsistenz zwischen erwarteter und gemessener W-Masse testen.

Abstrahlung von Photonen von stark geboosteten Protonen oder Ionen.

→ Identifikation von **Photon-induzierter Paarproduktion von W-Bosonen** oder von einem Lepton-Paar

→ Für Produktion von W-Bosonen:
Selektion von intakten oder fragmentierten Protonen mittels dem ATLAS Forward Proton Spektrometer + 2 geladene Lepton mit entgegengesetzter Ladung, sonst keine Aktivität

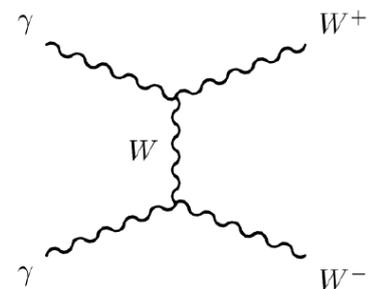
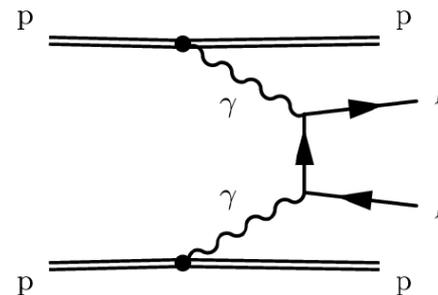
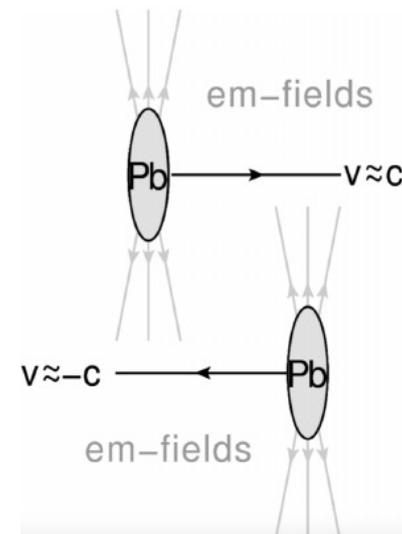
Auf LO nur Selbstkopplungen von elektroschwachen Eichbosonen

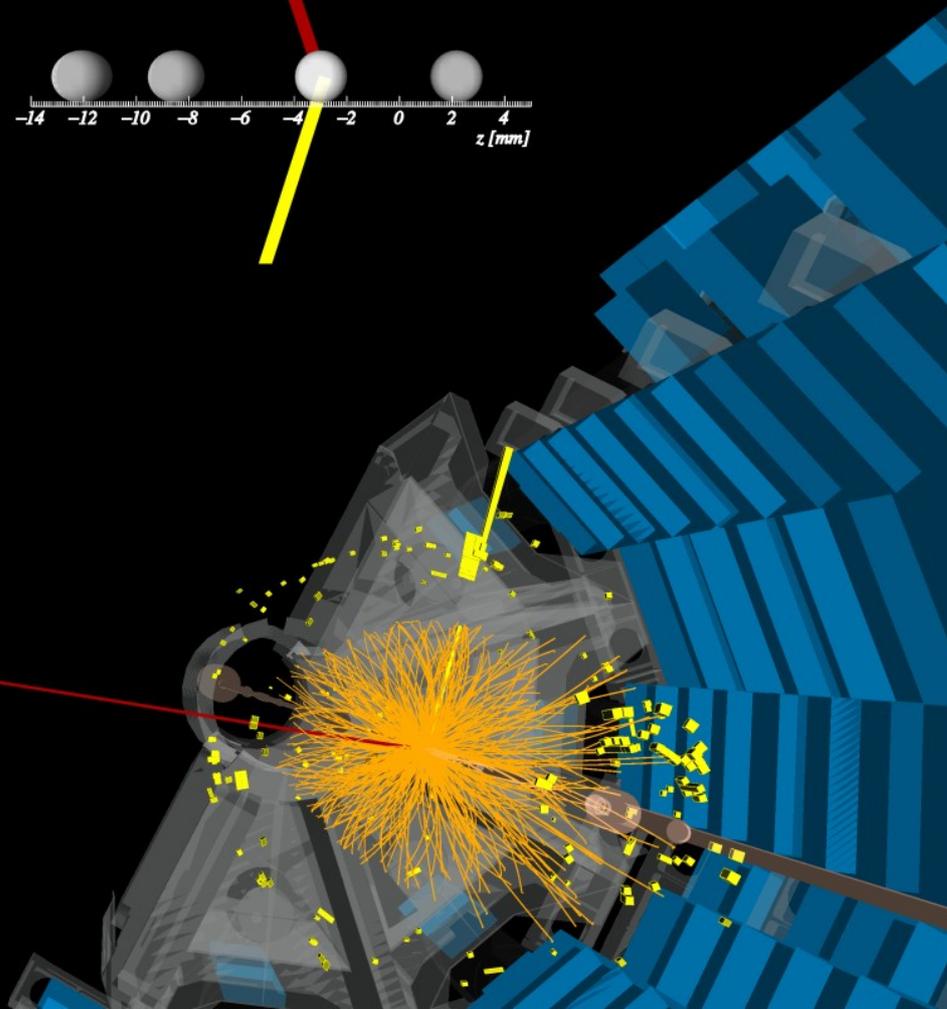
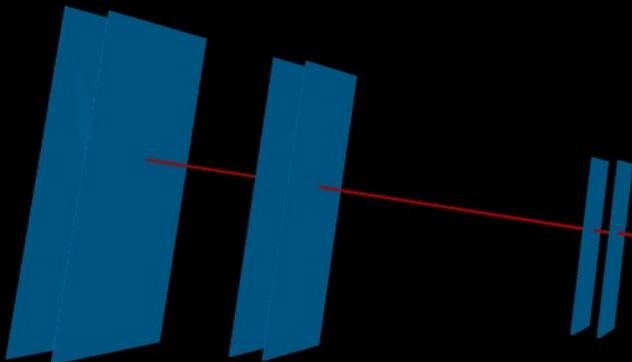
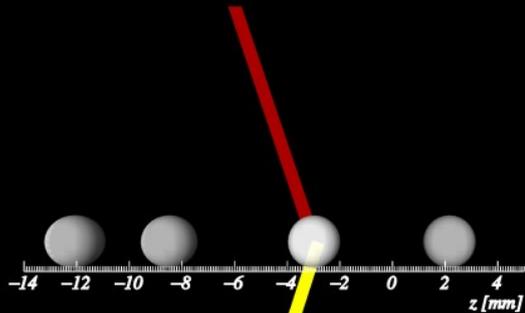
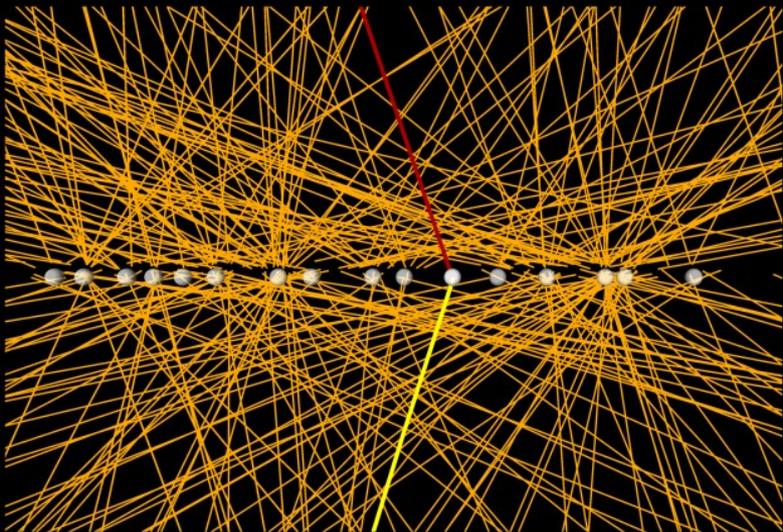
→ sensitiv zu anomalen Kopplungen.

Entdeckung von $\gamma\gamma \rightarrow WW$ mit

$$\sigma_{meas} = 3.13 \pm 0.13 \text{ (stat)} \pm 0.28 \text{ (syst) fb}$$

Konsistent mit der theoretischen Erwartung.

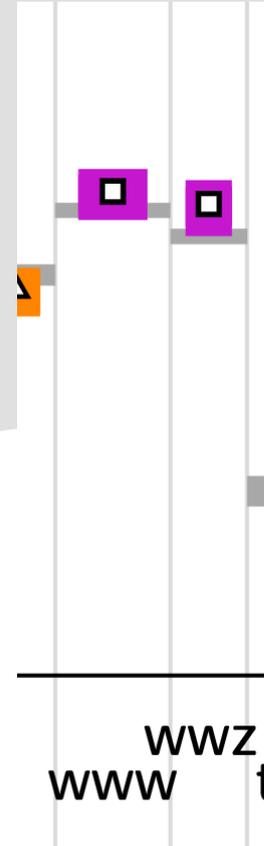




ATLAS
EXPERIMENT

Run: 357620
Event: 653219636
2018-08-06 01:08:33 CEST

Triple- Vektorbosonen



Produktion von VVV

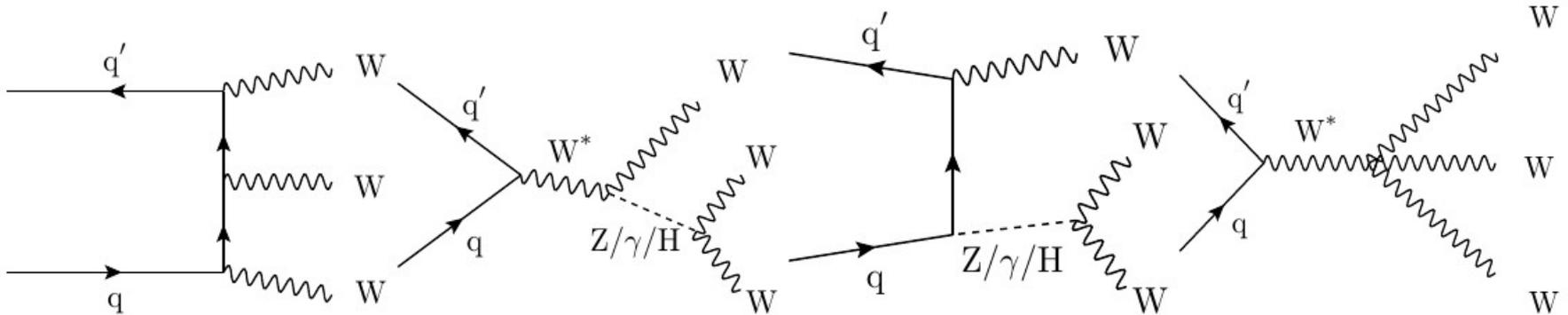
[Phys. Rev. Lett. 125 (2020) 151802,
Phys. Rev. D 100, 012004 (2019)]

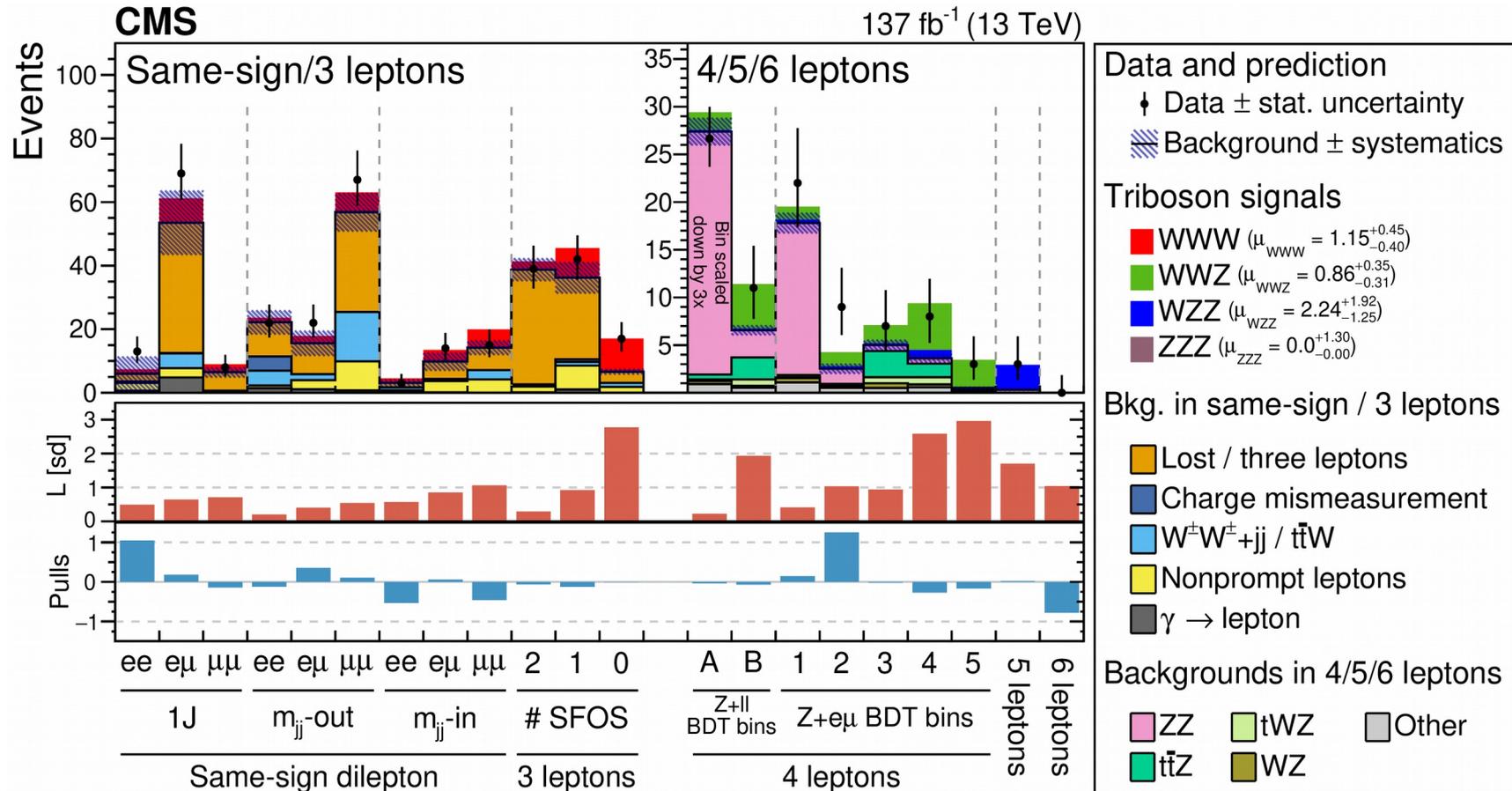
VVV-Produktion sensitiv auf triple und quartic Eichkopplungen (insbesondere 4-Boson-Ww) und somit auf den nicht-abelischen Charakter des SM

→ Abweichungen würden auf Physik jenseits des Standardmodells auf höheren Skalen hindeuten.

Messung von VVV-Produktion in 5 Endzuständen von CMS:

- Same-sign Leptonen → WWW
 - 3 Leptonen → WWW
 - 4 Leptonen → WWZ
 - 5 Leptonen → WZZ
 - 6 Leptonen → ZZZ
- } Verwendung von Boosted-Decision-Trees





Produktion von VVV

[Phys. Rev. Lett. 125 (2020) 151802]

Simultaner Fit aller
Signalregionen zusammen.

Beobachtete Signalstärke 5.7σ ,
Erwartung 5.9σ

→ erste Beobachtung von VVV
Produktion

Neues ATLAS-Ergebnis:

→ WWW-Produktion in Ereignissen
mit zwei gleich geladenenen
Leptonen + Jets, oder mit drei
Leptonen.

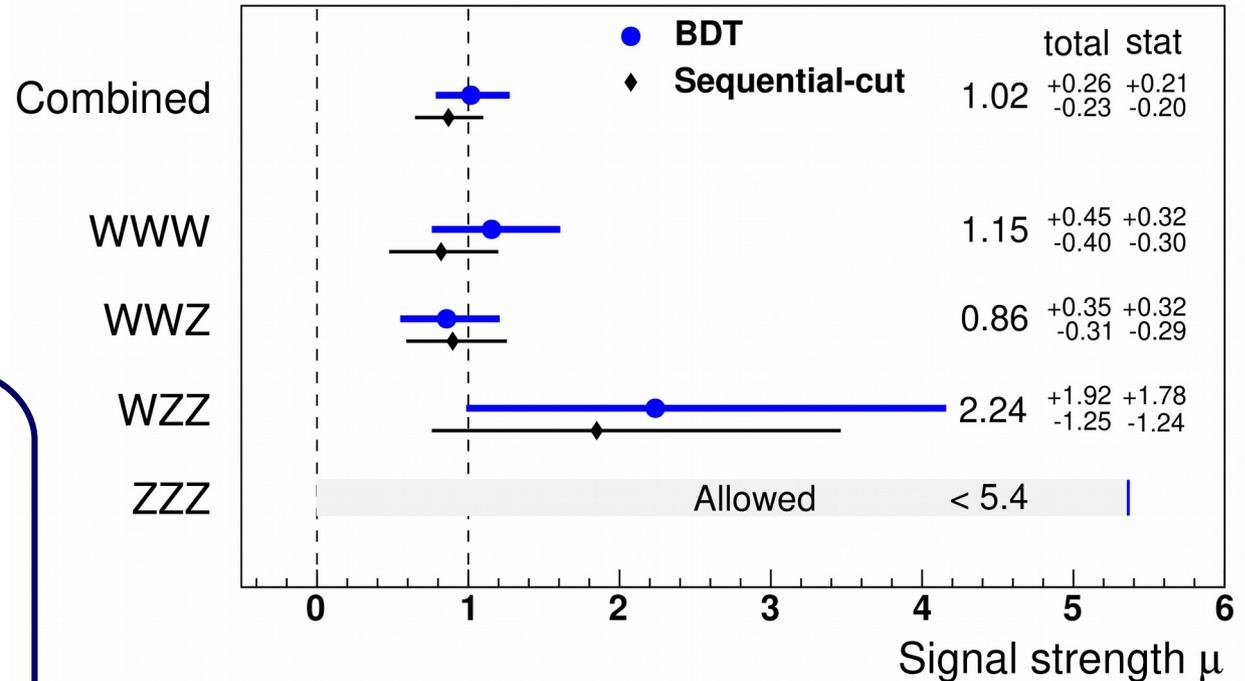
→ Verwendung von BDTs

→ WWW-Produktion beobachtet:

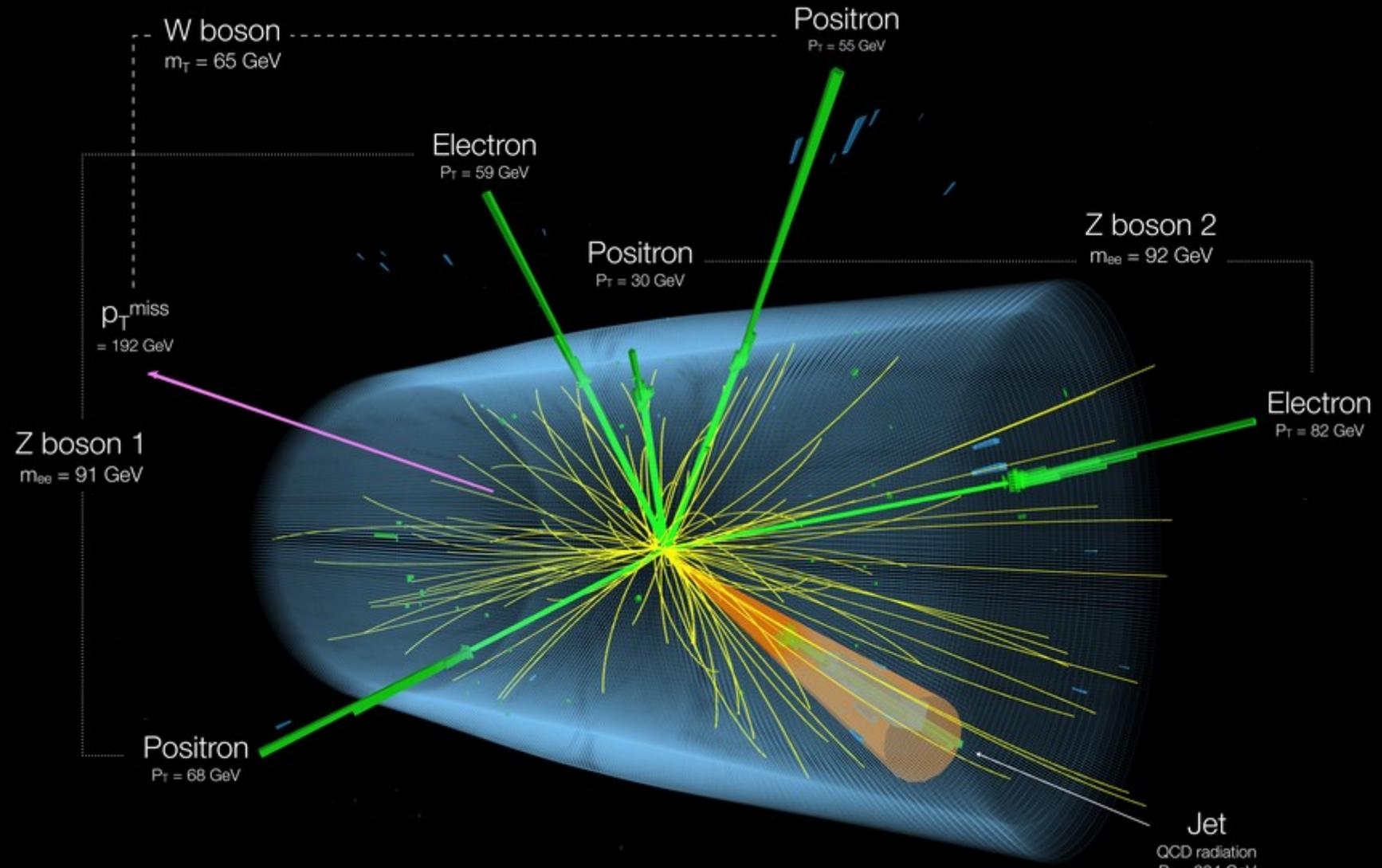
8.2σ

CMS

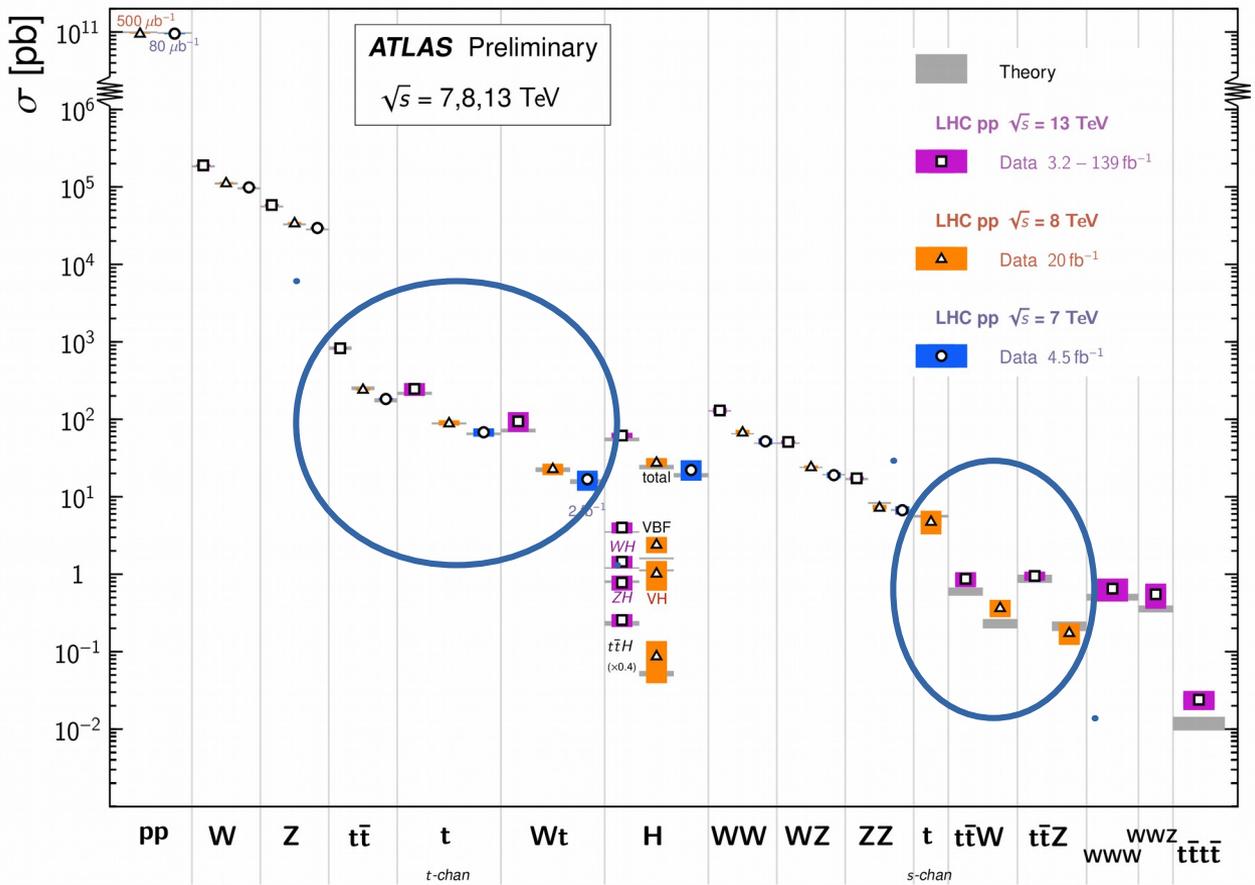
137 fb^{-1} (13 TeV)



WZZ → 5 lepton event



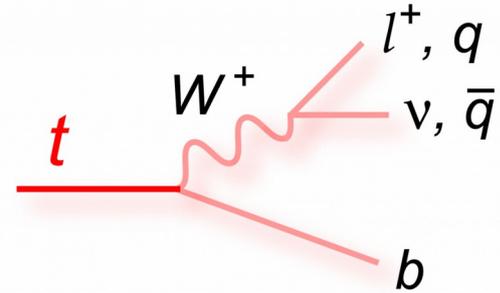
Standard Model Total Production Cross Section Measurements *Status: March 2021*



Top-Quark

Top-Quark

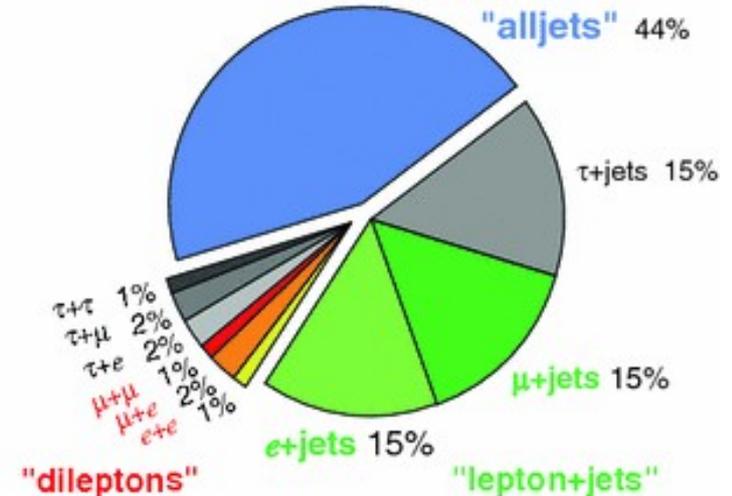
- Schwerstes bekannte Elementarteilchen
→ daher besonders sensitiv zu BSM-Effekten.
- 1995 entdeckt - LHC ist nun eine Top-Factory.
- Zerfällt bevor es hadronisieren kann, zu $\sim 100\%$ $t \rightarrow Wb$
- Gefolgt von hadronischen oder leptonicen Zerfällen
→ hadronische Zerfälle sind am häufigsten, aber auch hoher Untergrund.
→ rein leptonicen Zerfälle dagegen sehr klar zu identifizieren.



Top Pair Decay Channels

$\bar{c}s$	electron+jets	muon+jets	tau+jets	all-hadronic		
$\bar{u}d$				all-hadronic		
$\tau^+ \tau^-$	dileptons			tau+jets		
$\mu^+ \mu^-$				muon+jets		
$e^+ e^-$				electron+jets		
W decay	e^+	μ^+	τ^+	$u\bar{d}$	$c\bar{s}$	

Top Pair Branching Fractions



Messungen im Zusammenhang mit dem Top-Quark

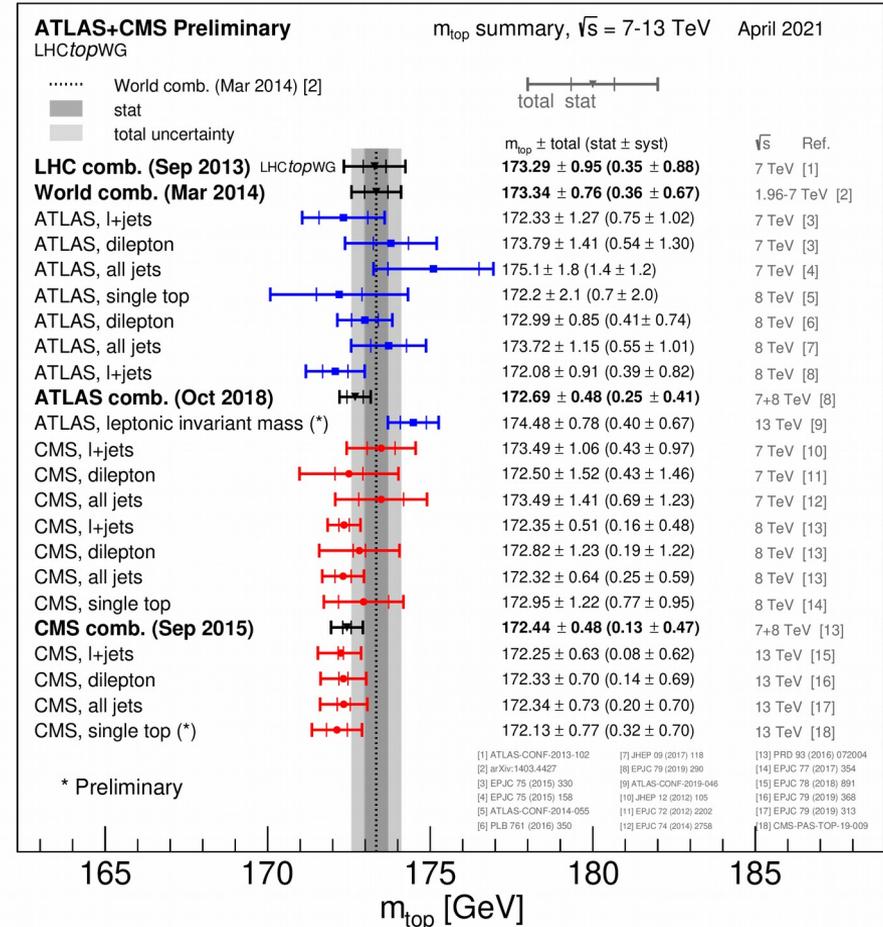
[ATL-PHYS-PUB-2021-015]

Weites Spektrum an Messungen rund um das Top-Quark:

- Masse, Breite, Ladung

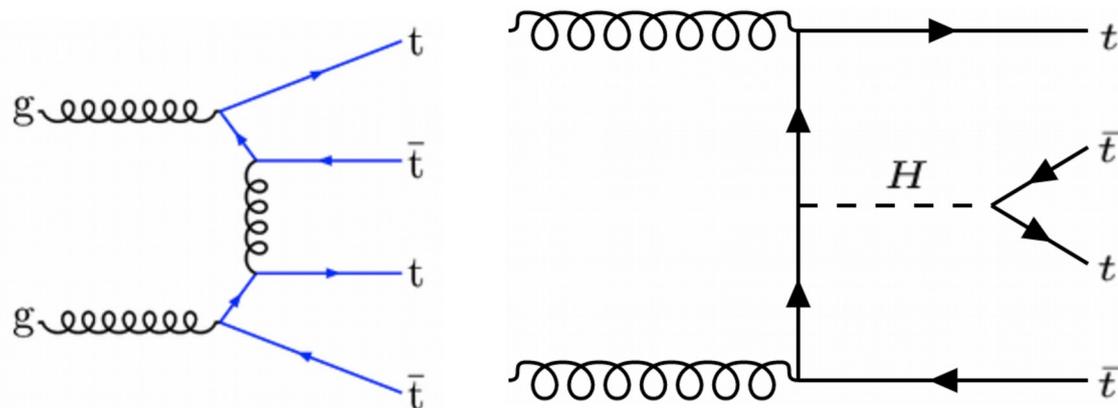
‘MC-Masse’: Masse rekonstruiert von den Zerfallsprodukten
 ‘Pol-Masse’: Masse des freien Teilchens

- V_{tb} in der CKM-Matrix
- Inklusiver und differentieller Wirkungsquerschnitt in Top-Paarproduktion oder Produktion eines einzelnen Tops
- Spin- und Polarisationsmessungen
 → Spinkorrelationsmessungen besonders sensitiv zu BSM-Effekten
- Prinzipiell Suchen nach BSM-Physik



$t\bar{t}t\bar{t}$ Produktion

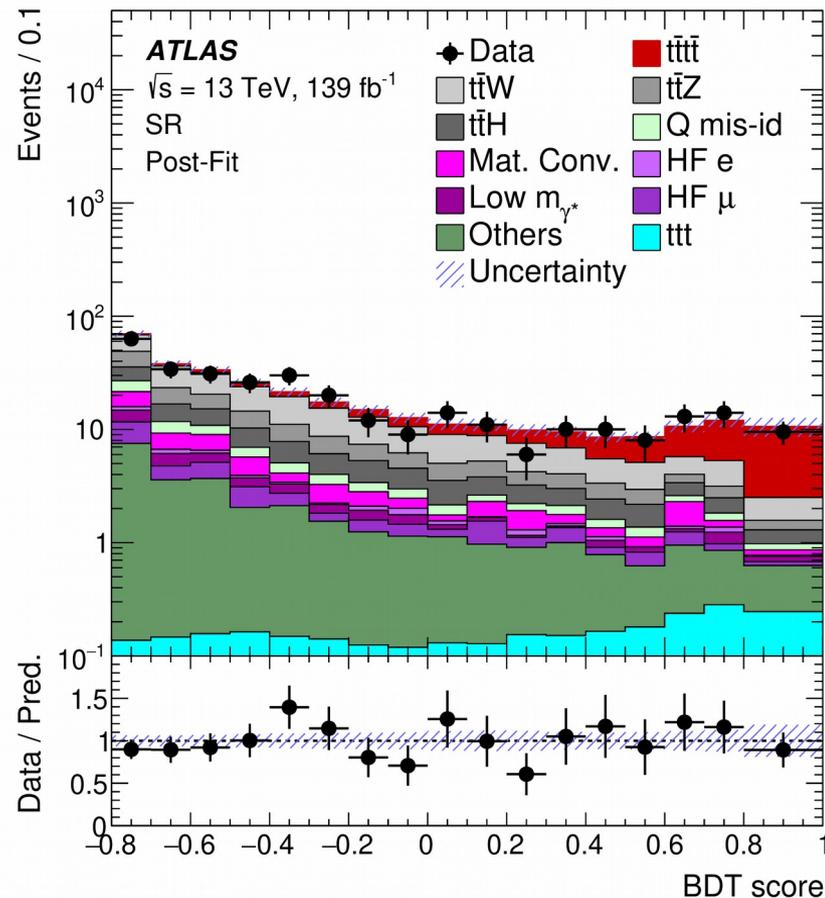
[Eur. Phys. J. C 80 (2020) 1085]



$t\bar{t}t\bar{t}$ sehr seltener Prozess im SM, der alle SM-Interaktionen mit einschließt, insbesondere sensitiv zu Größe und CP-Eigenschaften der Top-Higgs-Yukawa-Kopplung.

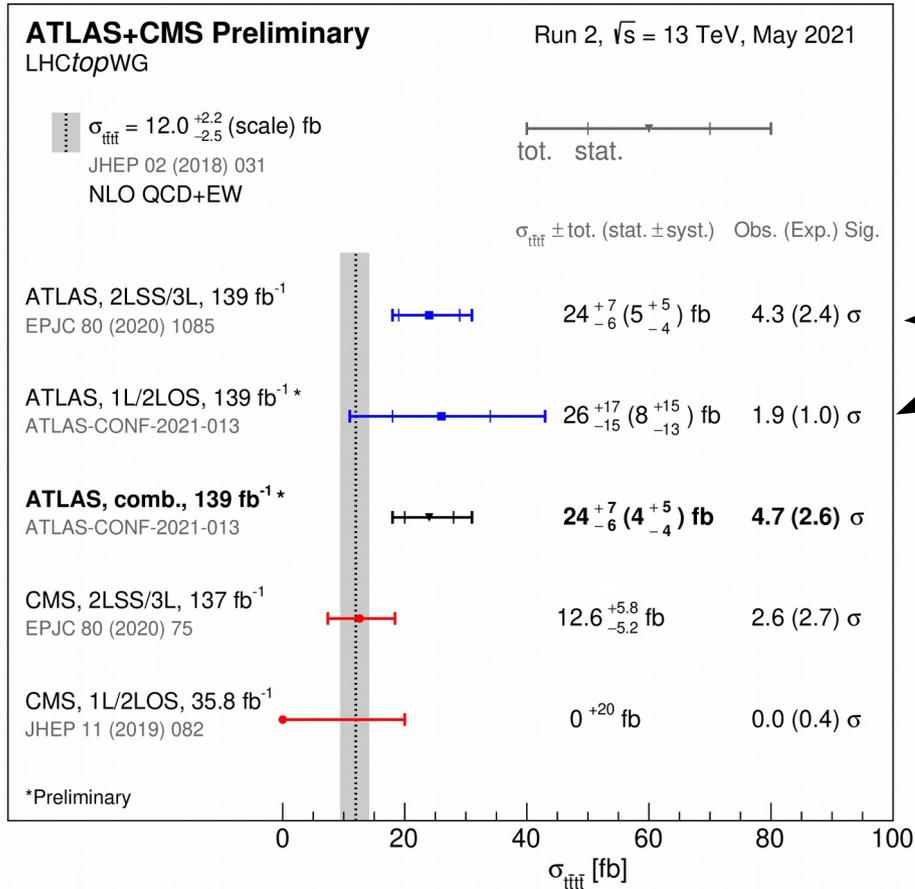
→ Erhöhter Wirkungsquerschnitt in vielen BSM-Szenarios.

Suche mittels BDT in Same-Sign Signaturen und Multi-Lepton-Signaturen.



Messung von $t\bar{t}t\bar{t}$

[arXiv:2106.11683,ATL-PHYS-PUB-2021-013]



Lepton-Kanäle kombiniert ergeben
Hinweis auf $t\bar{t}t\bar{t}$ Produktion -
Beobachtet 4.7 σ , erwartet 2.6 σ

Effective-Field-Theory (EFT) Ansätze in Top Analysen

[J. Gonzalez]

EFT-Ansätze hilfreich, falls Skala neuer Physik signifikant über der LHC-Skala $\Lambda \gg \Lambda_{\text{LHC}}$

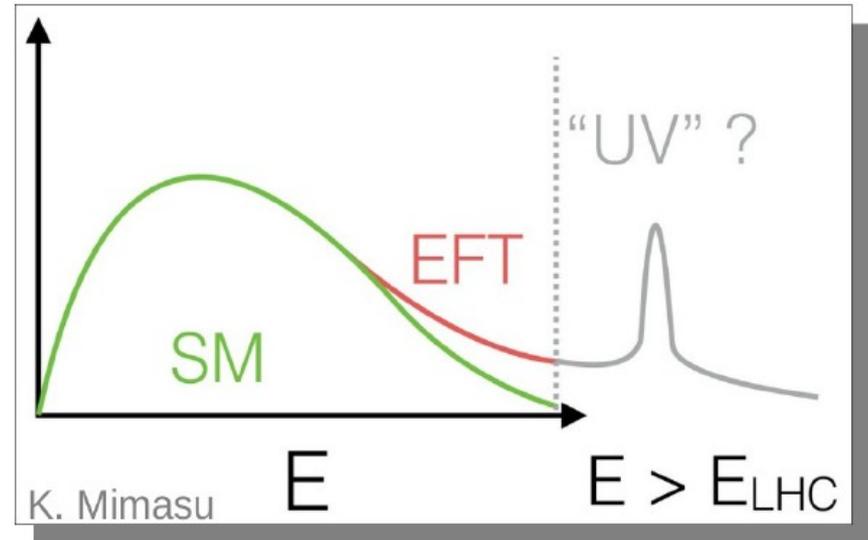
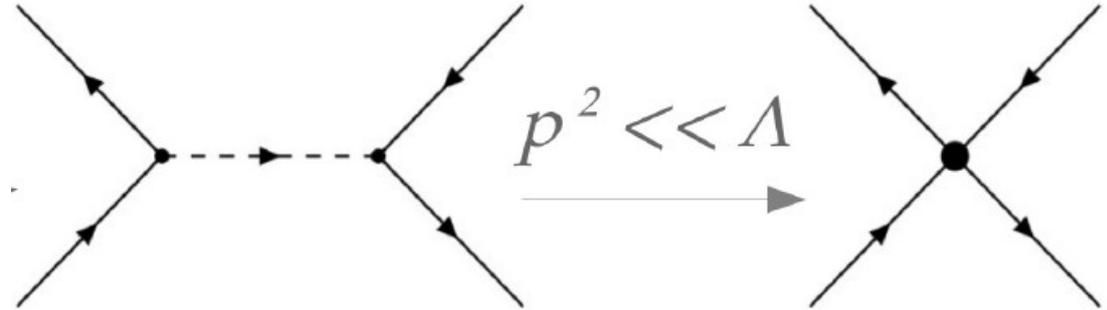
Erweiterung des SM-Lagrangians mit Termen höherer Ordnung:

$$\mathcal{L}_{\text{EFT}} = \mathcal{L}_{\text{SM}} + \sum_{d,i} \frac{c_i^d}{\Lambda^{d-4}} \mathcal{O}_i^d$$

Vorteile:

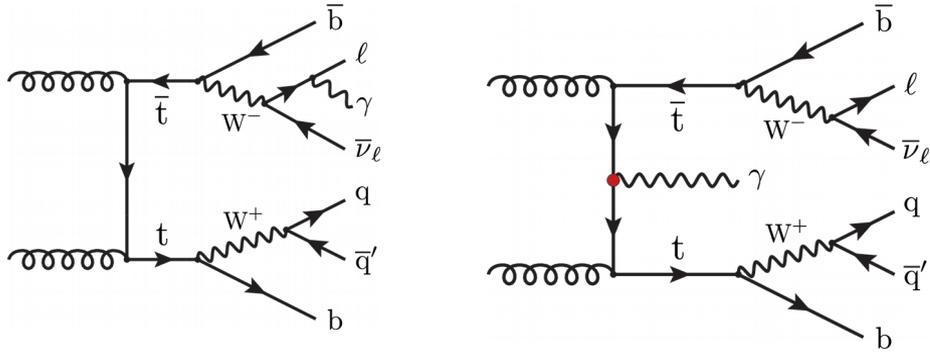
- Recht allgemein und modell-unabhängig.
- Observablen werden in korrelierter Art und Weise verändert.

Jedoch nur gültig falls Skala neuer Physik wesentlich höher als LHC-Skala.



Beispiel: EFT in $t\bar{t}\gamma$ -Produktion

[arXiv:2107.01508 [hep-ex]]

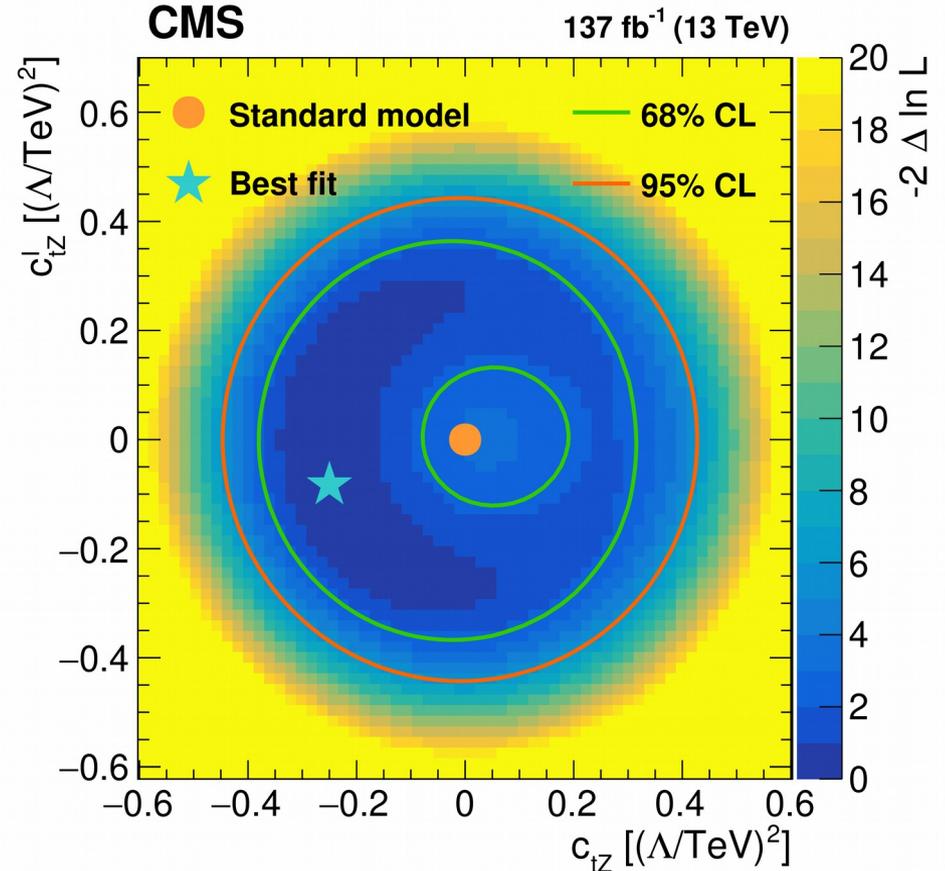


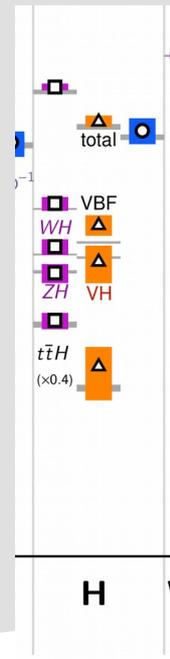
Erweiterung einer Messung des Wirkungsquerschnitts von $t\bar{t}\gamma$ -Prozessen

→ Ereigniselektion: isoliertes Elektron/Myon + zumindest 3 Jets (1 b-tagged) + 1 isoliertes Photon.

Untergründe: falsch identifizierte Leptonen, QCD multi-jet, nicht-prompente Photonen

→ EFT-Ansatz: Sensitiv zu Modifikationen in der $t\bar{t}\gamma$ -Kopplung.





Entdeckung und Präsizionsmessung vom Higgs- Boson

Die Theorieseite...

Warum wird das Higgs-Boson benötigt?

→ **Massengenerierung** für die massiven Eichbosonen in einer **lokal-eichinvarianten** Weise

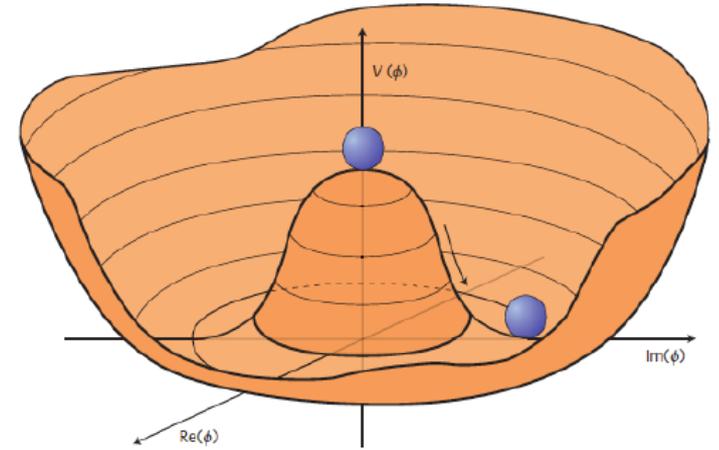
Wie?

- Einführung eines Higgsfeldes mit einem skalaren Potential

$$V(\Phi) = m^2\Phi^\dagger\Phi + \lambda(\Phi^\dagger\Phi)^2$$

$$\Phi = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{pmatrix} \sqrt{2}\phi^+ \\ \phi^0 + ia^0 \end{pmatrix}$$

- Spontane Symmetriebrechung
- Entwicklung des Potentials um Grundzustand



Erweiterung des SM-Lagrangians um:

$$\mathcal{L}_{\text{Higgs}} = (D_\mu\Phi)^\dagger(D^\mu\Phi) - V(\Phi)$$

Kopplung des Higgs-Felds mit sich, Vektorbosonen und Fermionen

Terme im Lagrangian, die die Kopplung des Higgs mit sich selber, W- und Z-Bosonen und Fermionen beschreiben:

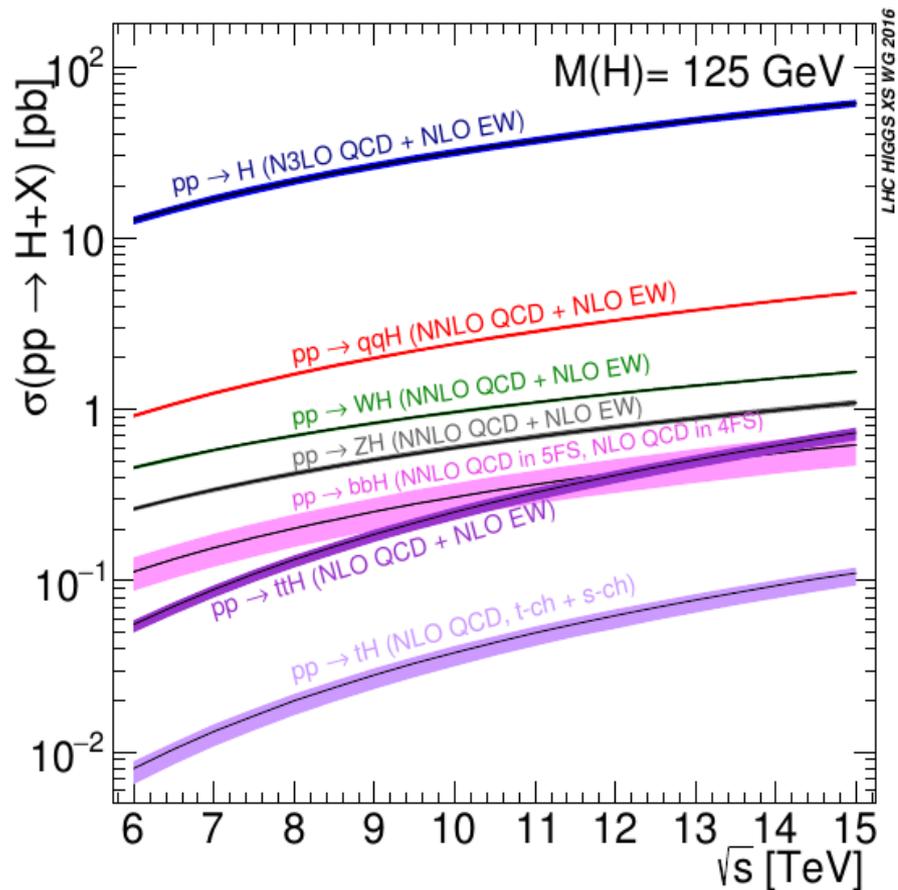
$$\mathcal{L} = -g_{Hf\bar{f}}\bar{f}fH + \frac{g_{HHH}}{6}H^3 + \frac{g_{HHHH}}{24}H^4 + \delta_V V_\mu V^\mu \left(g_{HVV}H + \frac{g_{HHVV}}{2}H^2 \right)$$

Mit:

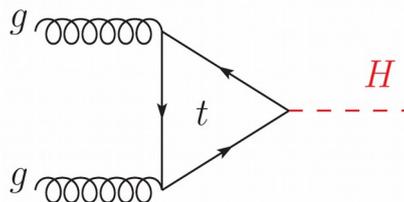
$$g_{Hf\bar{f}} = \frac{m_f}{v}, \quad g_{HVV} = \frac{2m_V^2}{v}, \quad g_{HHVV} = \frac{2m_V^2}{v^2}, \quad g_{HHH} = \frac{3m_H^2}{v}, \quad g_{HHHH} = \frac{3m_H^2}{v^2}$$

Ergebnis des Higgsmechanismus:

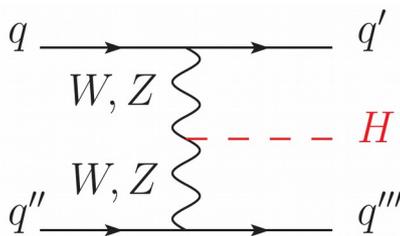
- Massives Higgsboson durch Anregung des Higgsfeldes mit **Selbstwechselwirkung**.
- Massengenerierung für W- und Z-Bosonen, und für massive Leptonen.
- Masse vom Higgs-Boson wird nicht vorhergesagt, auch nicht der Leptonen.
- **Kopplung vom Higgs zu Leptonen** \sim Masse von Leptonen.
- **Kopplung vom Higgs zu W- und Z-Bosonen** \sim (Massen von W- und Z-Bosonen)².



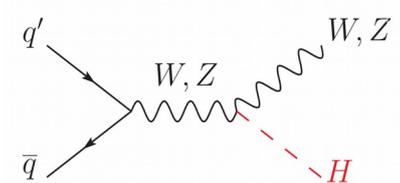
Produktion am LHC vor allem durch:



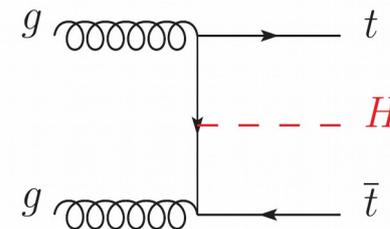
Gluon-Gluon-Fusion (ggF) – **dominiert**
- ca. 7 Mio. Ereignisse
@ 139 fb^{-1}



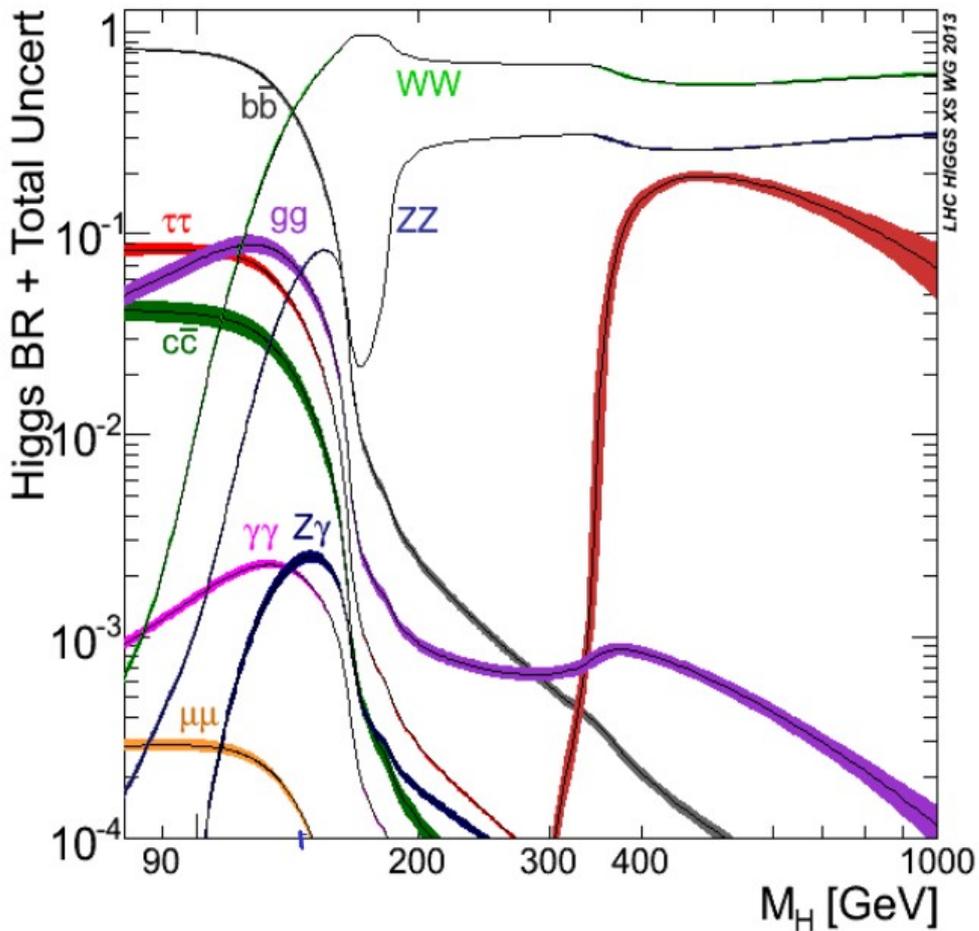
Vektor-Boson-Fusion
- ca. 0.5 Mio. Ereignisse



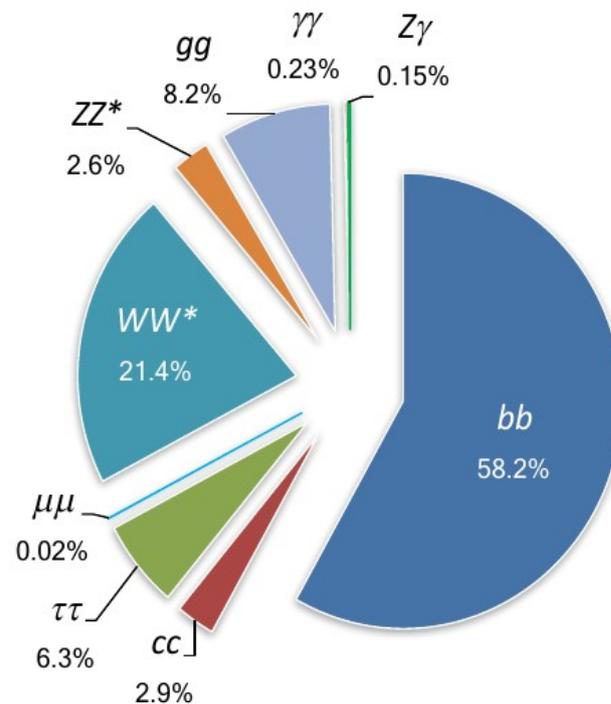
Assoziierte Produktion mit Vektorbosonen
- ca. 350000 Ereignisse



schweren Quarks
- ca. 70000 Ereignisse



Für $m_H = 125$ GeV, dominiert der Zerfall nach $b\bar{b}$

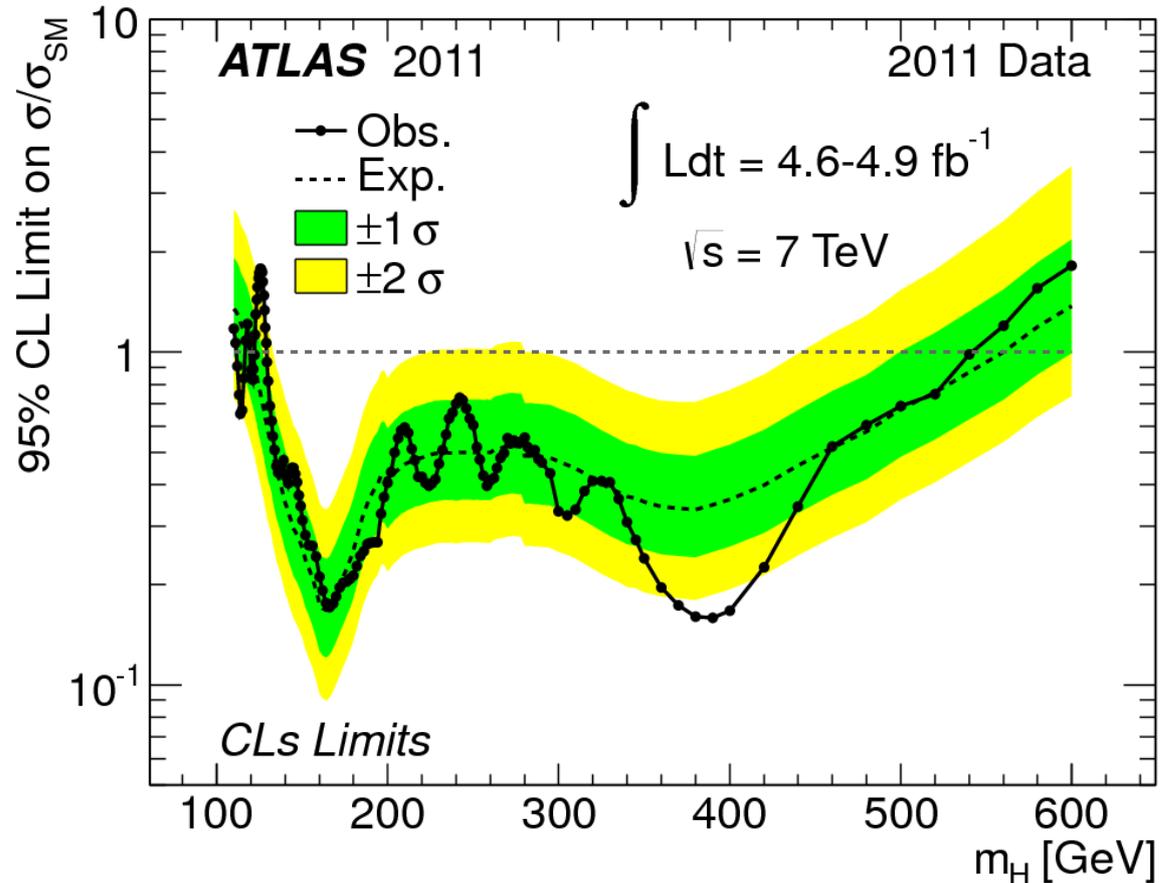


Kurz vor der Entdeckung des Higgs-Bosons

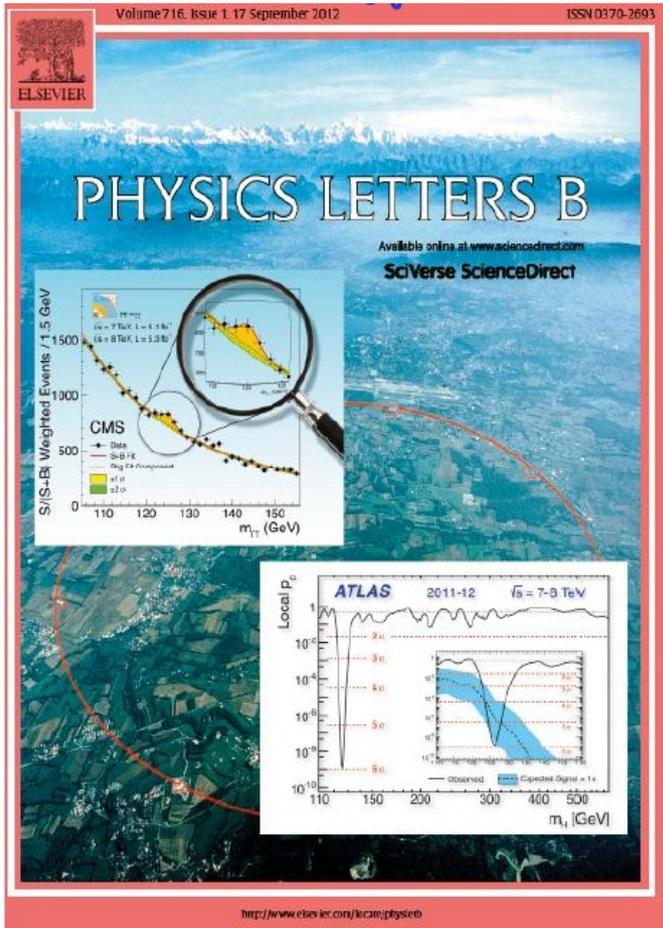
Masse des Higgs-Bosons nicht vorgegeben – freier Parameter.

→ Intensive Suche nach dem Higgs-Boson am LEP (maximale CME 209 GeV) und am Tevatron, dann am LHC.

→ Da Masse unbekannt, Suche über einen breiten Massenbereich.



Entdeckung eines Bosons mit $m = 125$ GeV am LHC 2012



Mit einem Teil des 8 TeV Datensatzes Entdeckung eines neuen Bosons am 4. Juli 2012 durch die ATLAS und CMS Kollaborationen.

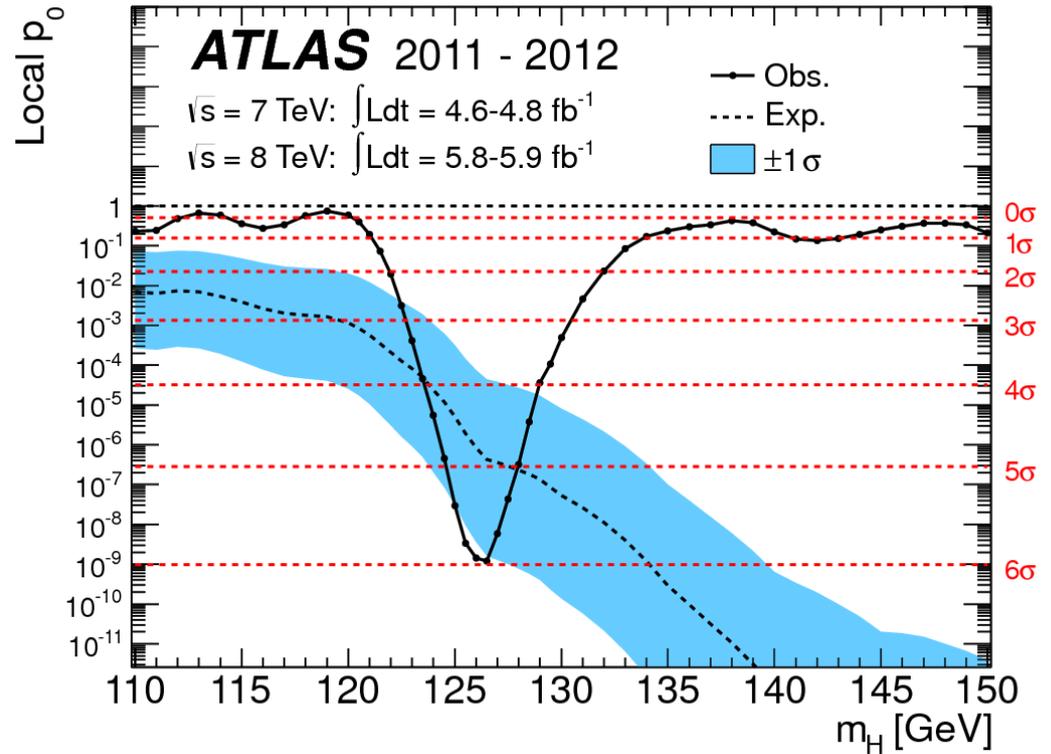
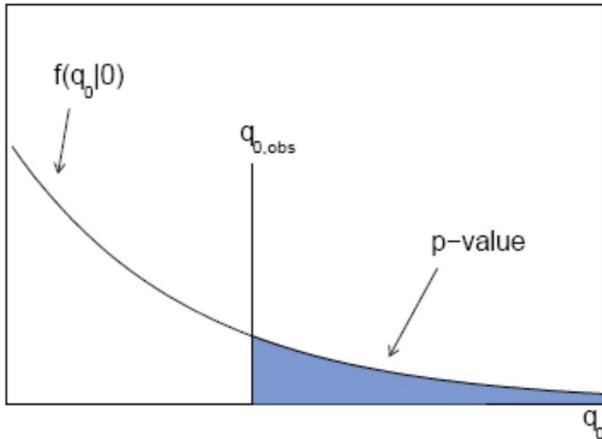


p-Werte

p-Wert:

Wahrscheinlichkeit die beobachtete Anzahl an Ereignissen in Daten zu erhalten, oder noch extremer, gegeben der Hypothese, in zukünftigen, wiederholten, identischen Experimenten

$$p_0 = \int_{-q_{0,obs}}^{\infty} f(q_0|0) dq_0$$



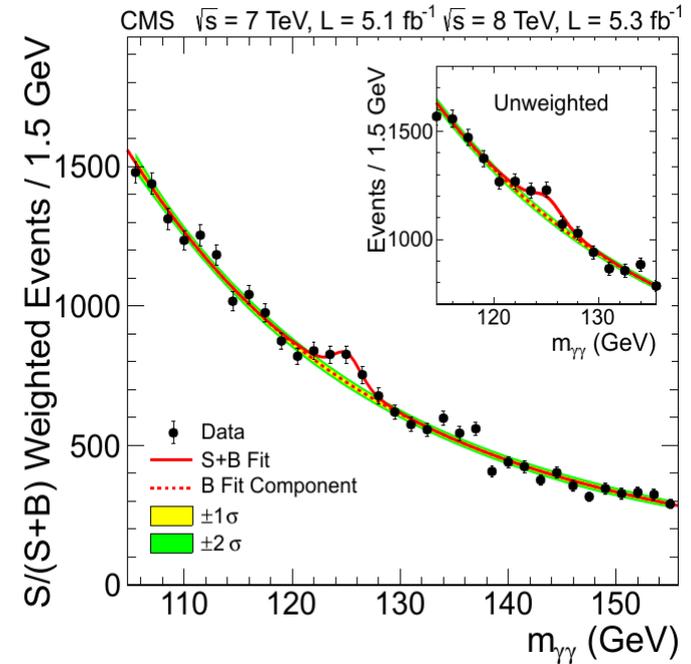
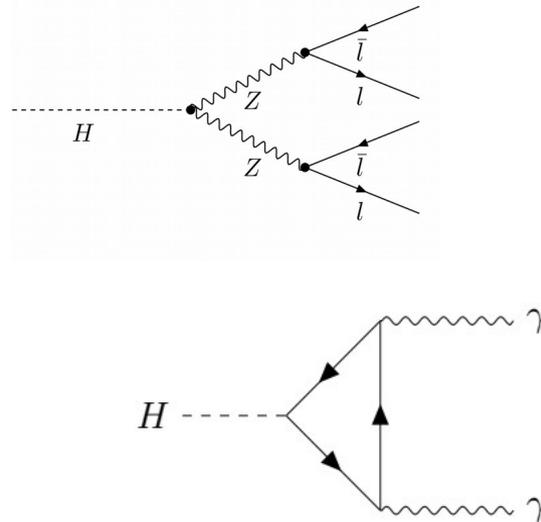
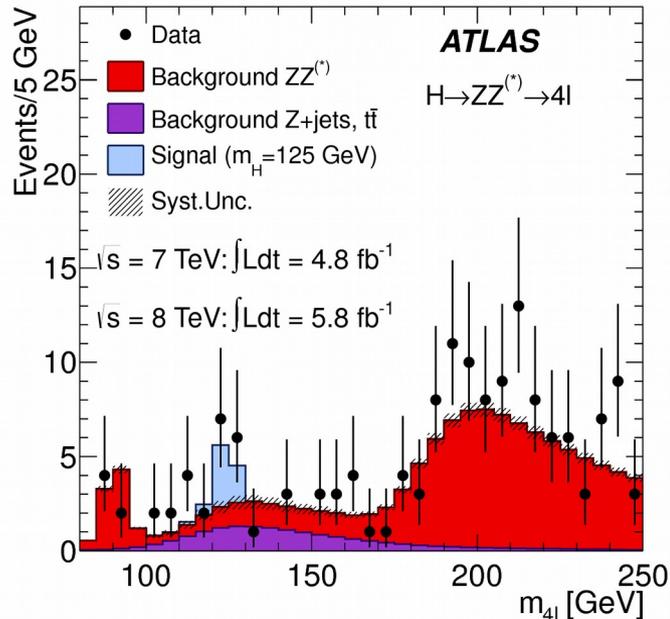
Entdeckungskanäle

[Phys. Lett. B 716 (2012) 1-29, J. High Energy Phys. 06 (2013) 081]

Für die Entdeckung Kanäle genutzt, die besonders gut vom hadronischen Untergrund separierbar sind

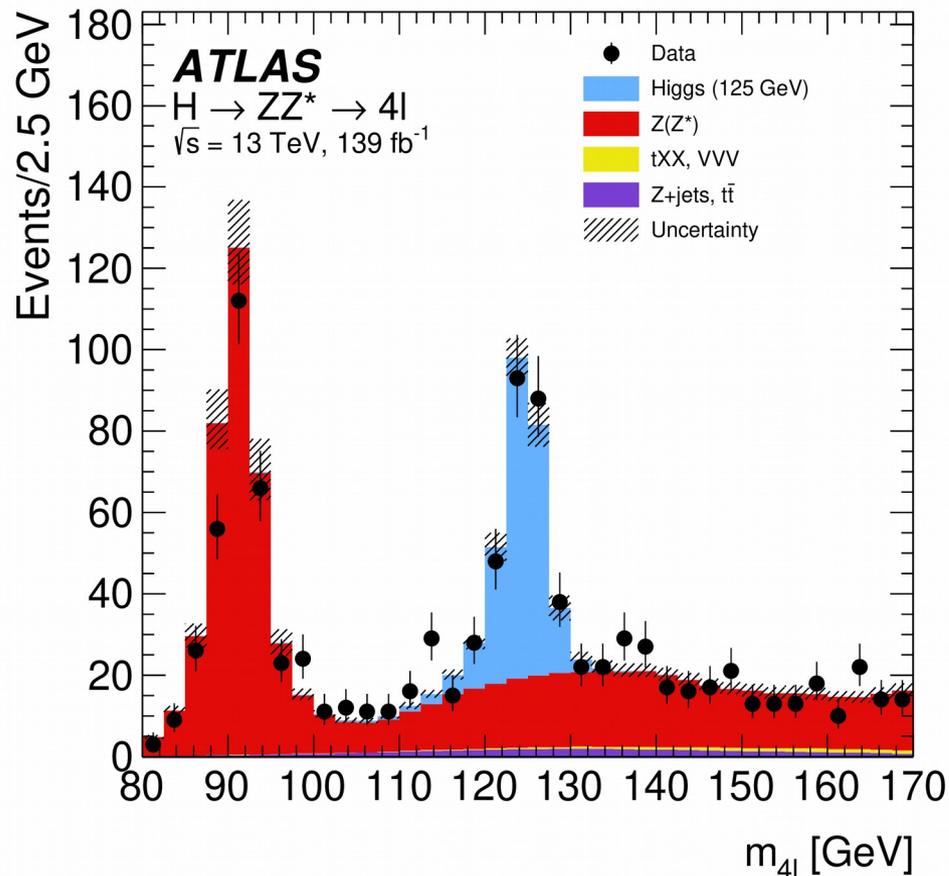
→ Rein leptonische Endzustände, d.h. $H \rightarrow ZZ \rightarrow 4l$

→ Endzustände nur mit Photonen, d.h. $H \rightarrow \gamma\gamma$



H \rightarrow ZZ* \rightarrow 4 Leptonen

[Eur. Phys. J. C 80 (2020) 942]



Verzweigungsverhältnis für einen komplett leptonischen Endzustand niedrig, aber auch niedriger Untergrund.

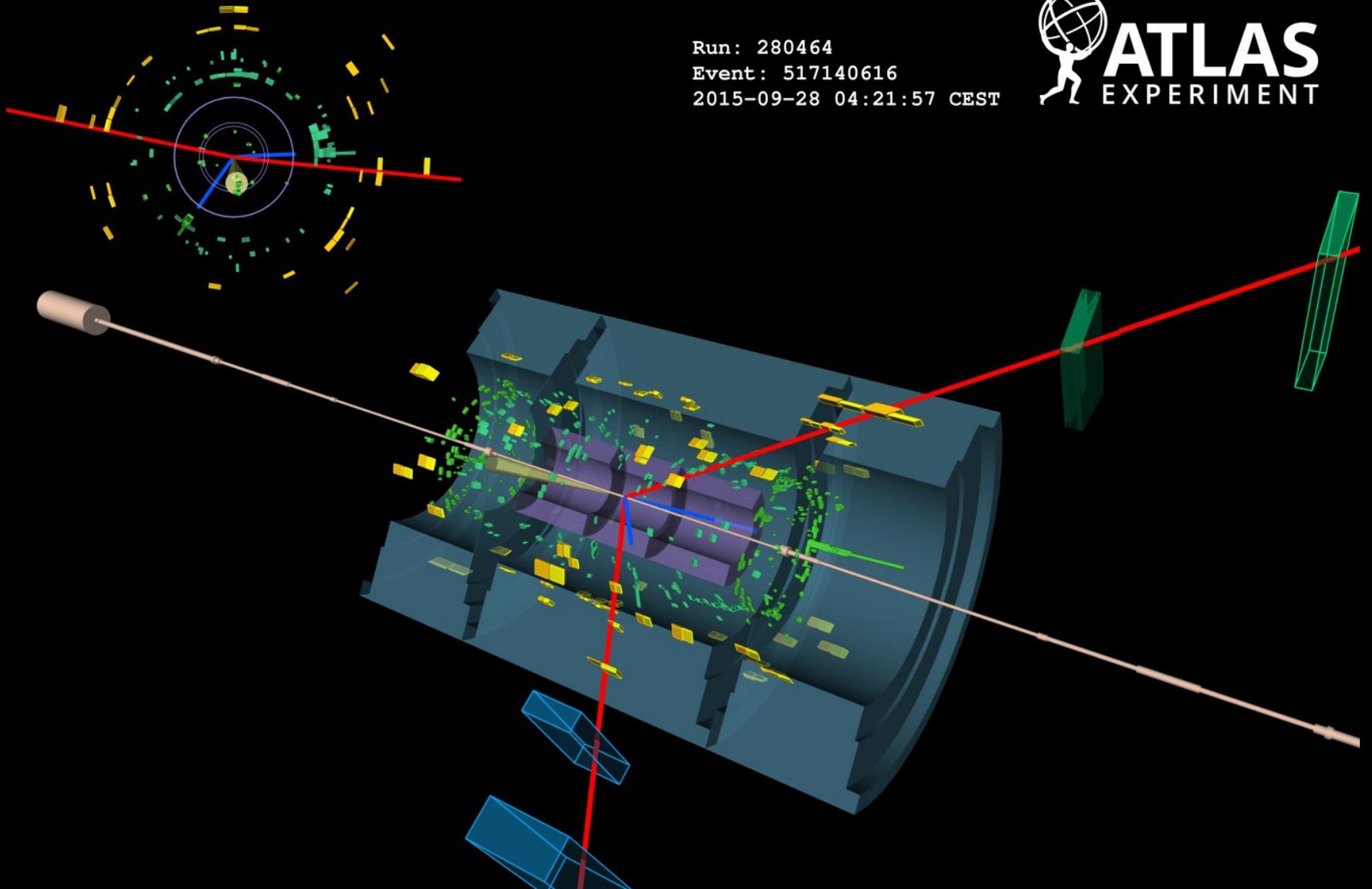
→ Hohe Rekonstruktions- und Identifikationseffizienz für Leptonen wesentlich.

Selektion mittels 2 Paaren von Elektronen oder Myonen mit entgegengesetzter Ladung jeweils kompatibel mit einem Z-Boson.

Untergünde: nicht-resonante Z/ γ Z/ γ -Prozesse (~90%), Z+jets, tt, WZ

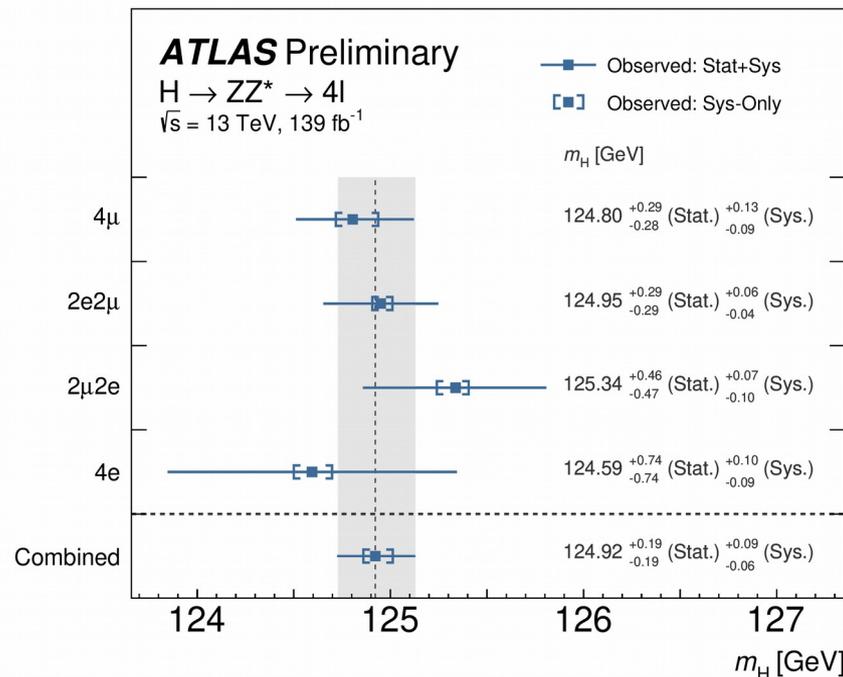
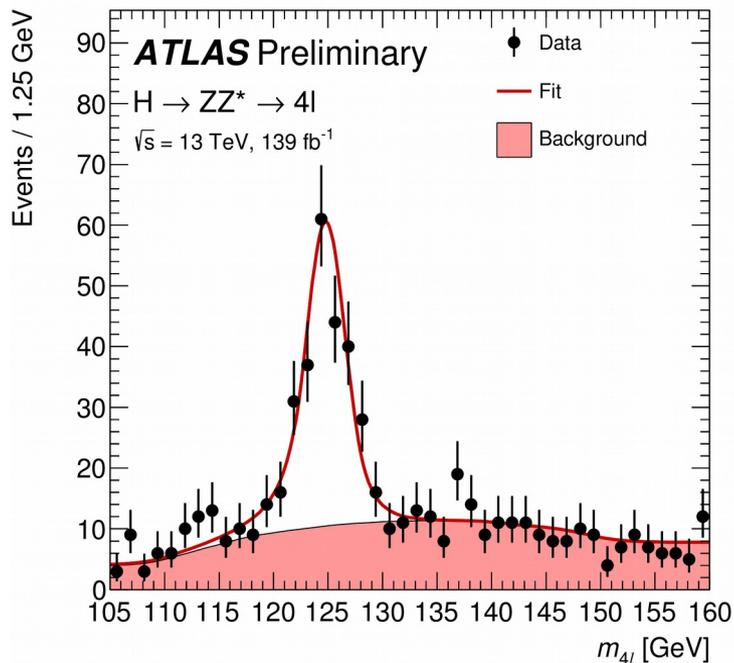
→ ZZ datengestützt mittels Seitenbänder bestimmt (im Gegensatz zu älteren Analysen, wo nur Simulation verwendet wurde).

Run: 280464
Event: 517140616
2015-09-28 04:21:57 CEST



H → ZZ* → 4 Leptonen - Massenmessung

[ATLAS-CONF-2020-005]

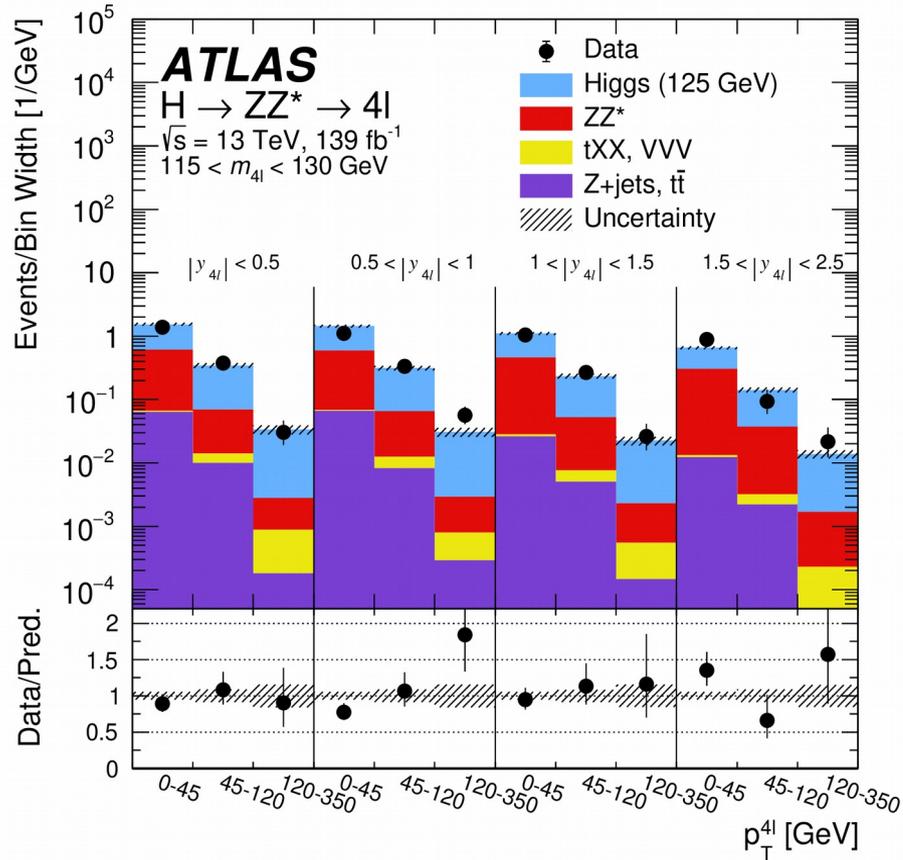


Massenmessung mittels simultanen Fit in 16 Ereigniskategorien. Freie Parameter Higgsmasse, und Normierung vom Higgs-Signal und vom ZZ*-Untergrund in allen Ereigniskategorien. Unsicherheiten dominiert durch die Unsicherheit auf die Muonimpulsskala.

Bemerkenswerte Präzision! Hadronmaschine nicht für Präzisionsmessungen geplant.

Messung des inklusiven und differentiellen fiducial Wirkungsquerschnitts

[Eur. Phys. J. C 80 (2020) 942]



Differentieller fiducial Wirkungsquerschnitt sensitiv zu Eigenschaften in Produktion und Zerfall vom Higgs-Boson, z.B.:

- Transversalimpuls vom Higgs:
 - ♦ Test störungstheoretischer Berechnungen
 - ♦ Sensitiv zur Struktur der Higgs-Interaktionen
 - ♦ Charm- und Bottom-Koppelungen
- Rapidität:
 - ♦ QCD-Strahlungskorrekturen

Messung inklusiver fiducial Wirkungsquerschnitt

$$\sigma_{\text{fid}} = 3.28 \pm 0.30 \text{ (stat.)} \pm 0.11 \text{ (syst.)}$$

Gut im Einklang mit SM-Erwartungen:

$$\sigma_{\text{fid,SM}} = 3.41 \pm 0.18 \text{ fb.}$$

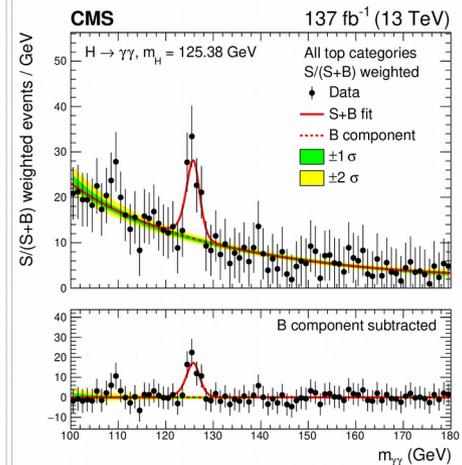
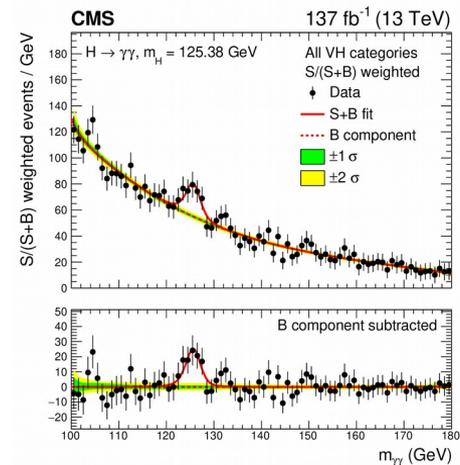
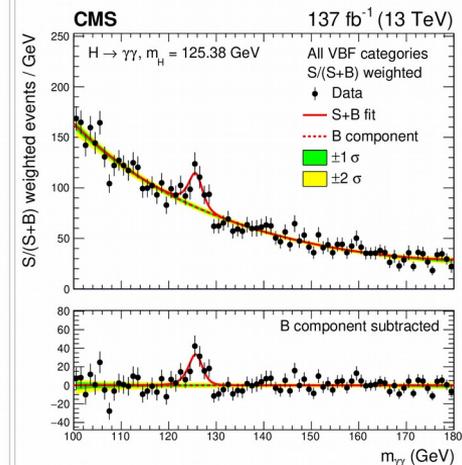
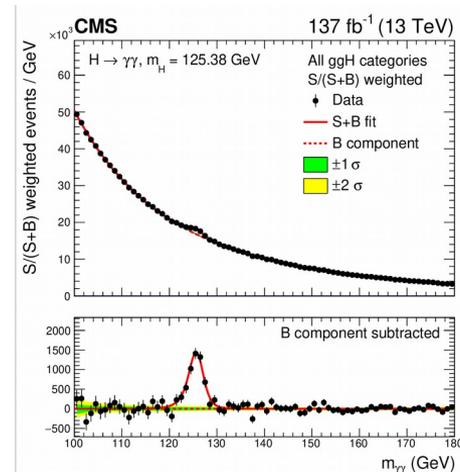
H \rightarrow $\gamma\gamma$

[arXiv:2103.06956 [hep-ex]]

Nur kleines Verzweigungsverhältnis von 0.23%,
aber sehr saubere Signatur.

→ Zudem sensitiv zu allen Higgs-Produktionsmodi.

- Verschiedene ML-Techniken verwendet, um zu den jeweiligen Kategorien optimale Sensitivität zu erlangen.
- Untergrundmodell mittels einer analytischen Funktion, die aus Exponentialfunktionen, Bernstein-Polynomen, Laurent-Serien, und Potenzfunktionen ausgewählt wird.
- Verschiedene Interpretationen: Messungen des Wirkungsquerschnitts, der Signalstärke und Kopplungen.



H → b \bar{b}

[Eur. Phys. J. C 81 (2021) 178]

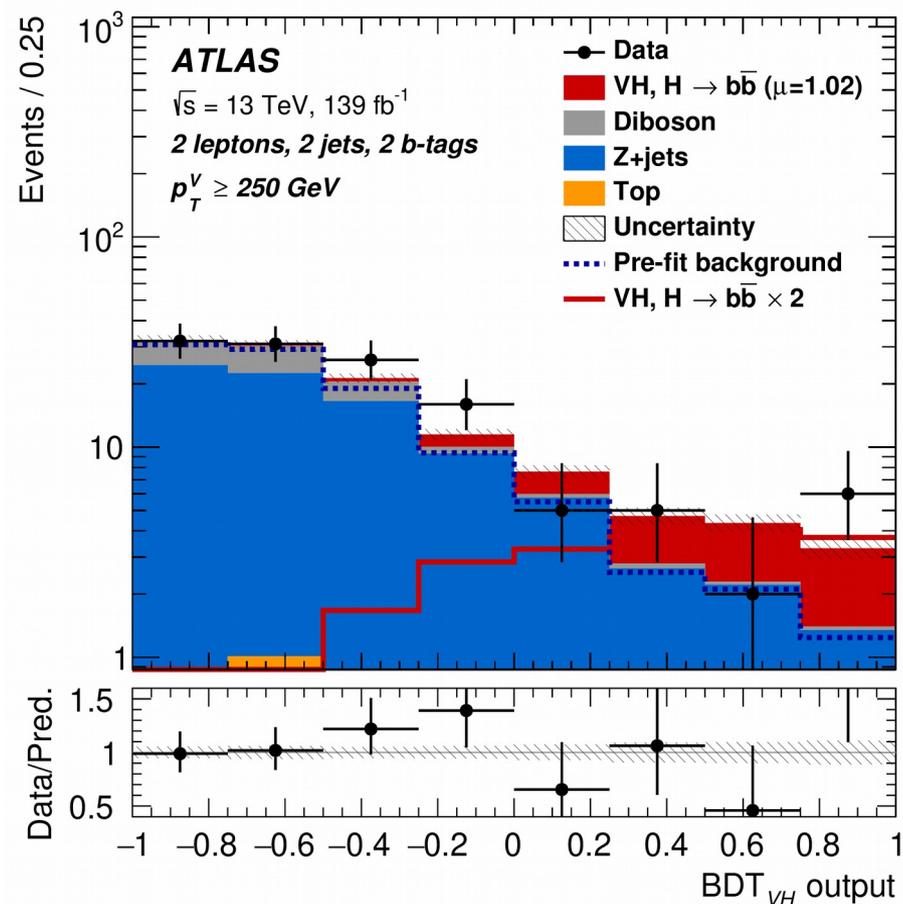
**Verzweigungsverhältnis H→b \bar{b} 58.2%, aber sehr hoher hadronischer Untergrund in ggF
→ Entdeckung von H→b \bar{b} erst 2018**

Entdeckungskanal: Vektor-Boson assoziierte Produktion vom Higgs-Boson mit H→b \bar{b} und leptonischen Zerfällen vom Vektorboson.

Inzwischen ausreichend Statistik um den fiducial Wirkungsquerschnitt zu messen.

Kanäle:

- Z(→ $\nu\nu$)H(→ b \bar{b}) in Ereignissen ohne Lepton aber mit hoher E_T^{miss}
- W(→ $l\nu$)H(→ b \bar{b}) in Ereignissen mit einem Lepton
- Z(→ ll)H(→ b \bar{b}) in Ereignissen mit zwei Leptonen
+ 2 oder 3 Jets, davon 2 B-tagged



H \rightarrow $b\bar{b}$

[Eur. Phys. J. C 81 (2021) 178]

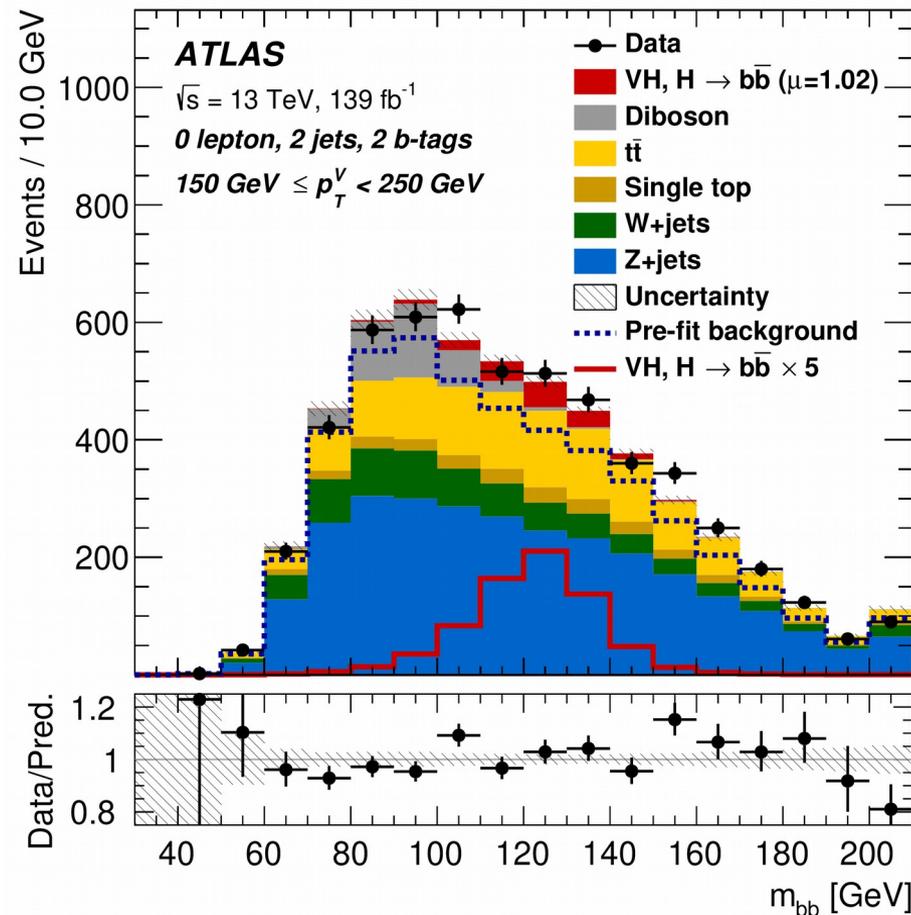
Analysestrategie:

- BDT in den Analysekanälen
- Binned Maximum Likelihood Fit in den Outputverteilungen des BDTs
- Dabei ein Fit, der die VH-Signalstärke bestimmt, und ein zweiter der die WH- und ZH-Signalstärken separat bestimmt.

Ergebnis auch überprüft mit einer Analyse ohne multivariante Variablen, sondern Verwendung der Dijet-Masse.

Signifikanzen:

- WH: 4.0σ (erwartet 4.1σ)
- ZH: 5.3σ (erwartet 5.1σ)

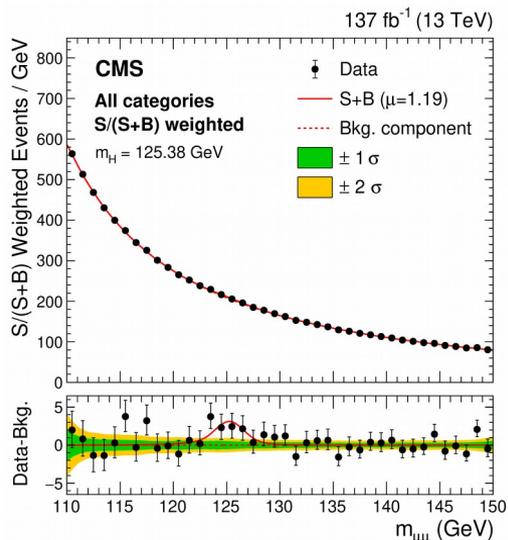


Seltene Zerfallskanäle

[JHEP 01 (2021) 148]

Hinweis auf $H \rightarrow \mu\mu$:

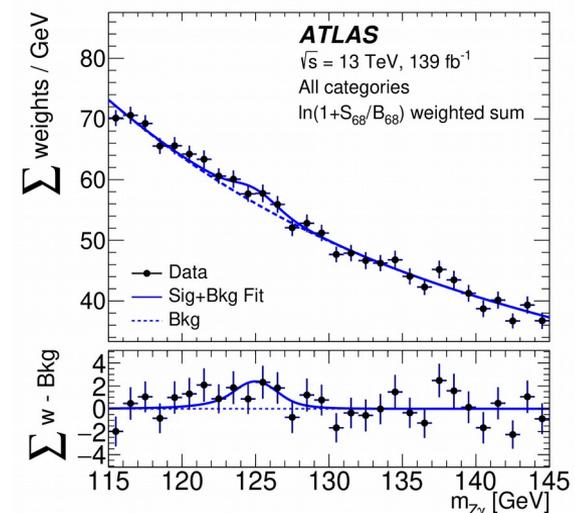
- Besonders sensibler Kanal für Kopplungen vom Higgs an die zweite Fermion-Generation.
- Invariante Masse vom Di-Myon-System besonders diskriminierend.
- Kombination von multivarianten Analysen in den vier Hauptproduktionskanälen.
- Signifikanz 3.0σ (2.5σ erwartet)



[Phys. Lett. B 809 (2020) 135754]

$H \rightarrow Z\gamma$:

- Seltener Prozess mit $B(H \rightarrow Z\gamma) = (1.54 \pm 0.09) \times 10^{-3}$ mittels Loops.
- Selektion mittels gegensätzlich geladenen Lepton konsistent mit einem Z-Boson + Photon.
- Signifikanz 2.2σ (1.2σ erwartet).



Zusammenfassung Eigenschaften

Kopplungen:

- Zerfälle in **WW**, **ZZ**, **yy**, und dritte Generation **b \bar{b}** , **$\tau\tau$** nachgewiesen.
- Hinweis auf **H $\rightarrow \mu\mu$** .
- Produktion vom Higgs-Boson in **Assoziation mit Top-Quarks** nachgewiesen.

Masse:

- Bester Wert aktuell: 125.25 ± 0.17 GeV (PDG)

Spin:

- Spin 1 aus Zerfällen in WW und ZZ, sowie in yy ausgeschlossen (folgt aus Landau-Yang-Theorem).
- Spin 2 zu 99.9% ausgeschlossen aus Analysen der Tensorstruktur.
- Bleibt Spin 0 wie im SM erwartet.

Parität:

- Ungerade Parität zu 99.9% von ATLAS und CMS ausgeschlossen. (Messung der CP-Struktur auf Hff-Kopplung)
- (Bei-)mischungen von gerade und ungerade Parität noch nicht komplett ausgeschlossen, auch nicht-SM anomale Kopplung noch nicht ausgeschlossen.
- SM verlangt gerade Parität.

Zusammenfassung Vorlesung 2

- Der LHC hat sein wichtiges Ziel, die Entdeckung des Higgs-Bosons erreicht, und sogar übertroffen.
→ Beeindruckende Menge an Präzisionsmessungen inklusive seltener Zerfalls- und Produktionskanäle im Higgs-Sektor am LHC.
- Ebenso beeindruckende Anzahl an Präzisionsmessungen des Standardmodells im Bereich der elektroschwachen Bosonen und des Top-Quarks am LHC, obwohl ein Hadronkollider nicht als Präzisionsmaschine ausgelegt ist.
- Einschließlich vieler sehr seltener Prozesse, wie z.B. Vier-Top-Quark-Produktion.
- Diese Messungen sind zumeist auch geeignet BSM-Physik bei höheren Skalen als am LHC zugänglich einzuschränken.

Morgen:

- Warum sind Suchen nach BSM-Physik so wichtig?
- Status der Suchen nach Dunkler Materie, langlebigen Teilchen, Leptoquarks und nach zusätzlichen Higgs-Bosonen.
- Ausblick auf neue Experimente/Techniken für die zukünftigen Datennahmeperioden.

Backup

