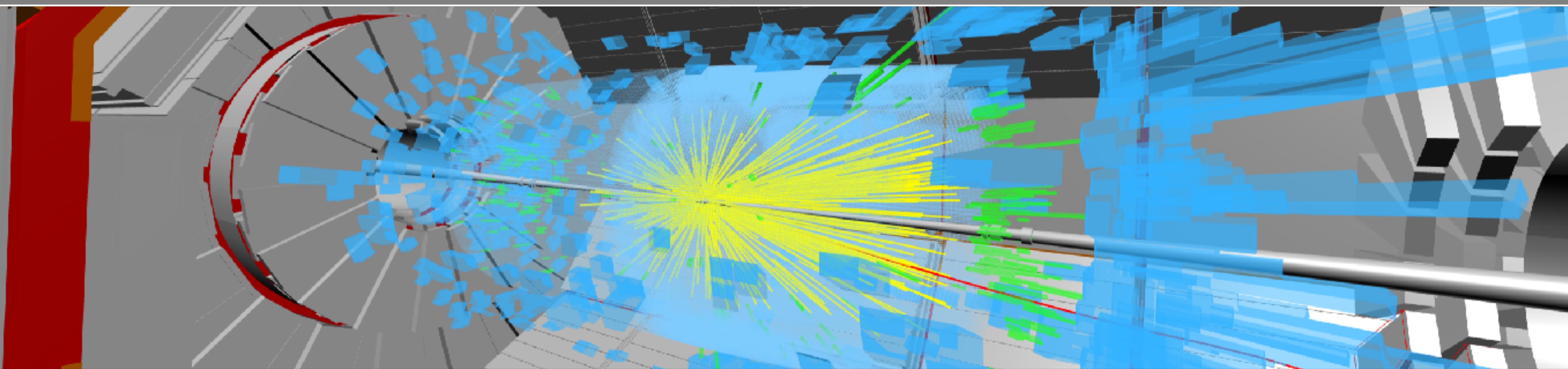


Moderne Experimentalphysik III – Teilchen und Hadronen

Karlsruher Institut für Technologie
Sommersemester 2019 – 17. Vorlesung (Teil 1)

ULRICH HUSEMANN, KATHRIN VALERIUS

Bildquelle: CMS



Auflösung Aufgabe 29

- Welche Aussagen zur Physik an B-Fabriken sind korrekt?
- A. Werden B^+ - B^- -Paare erzeugt, so bilden diese bis zum Zerfall eines der B^- -Mesonen ein verschränktes Quantensystem.
 - B. Werden B^0 - \bar{B}^0 -Paare erzeugt, so bilden diese bis zum Zerfall eines der B^- -Mesonen ein verschränktes Quantensystem.
 - C. In asymmetrischen e^+e^- -Collidern lassen sich Zerfallsröhren besser bestimmen als in symmetrischen.
 - D. CP-Verletzung in der Interferenz lässt sich beobachten, wenn B^0 und \bar{B}^0 in unterschiedliche CP-Eigenzustände zerfallen.
 - E. Die $\Upsilon(4S)$ -Resonanz liegt unterhalb der $B\bar{B}$ -Produktionsschwelle.

Kurze Wiederholung

■ Präzisionsmessungen bei LEP:

- $e^+e^- \rightarrow Z \rightarrow f\bar{f}$ (Z-Resonanz): Messung von Z-Boson-Masse und Breite, Zahl der leichten Neutrinoflavors u.v.m.
- $e^+e^- \rightarrow \gamma^*/Z \rightarrow W^+W^-$: Messung der W-Boson-Masse
- Messungen der Standardmodellparameter → elektroschwacher Fit

■ Experimente an B-Fabriken: $e^+e^- \rightarrow \Upsilon(4S) \rightarrow B\bar{B}$

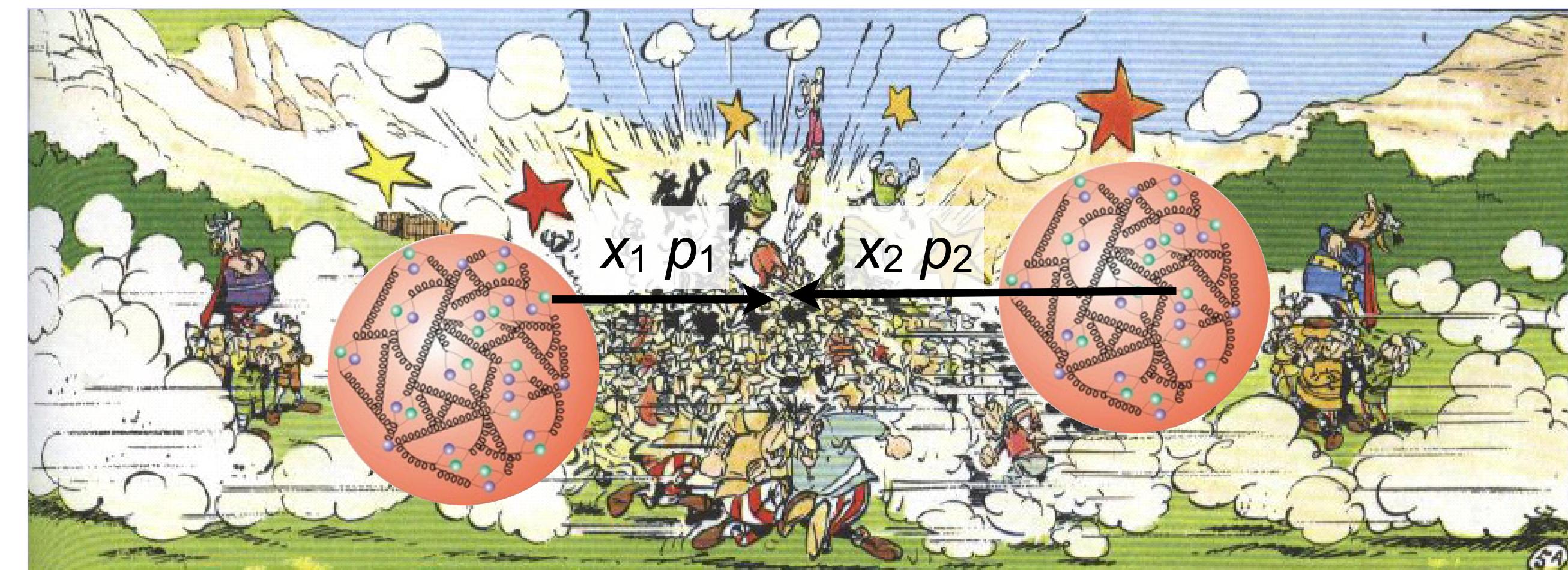
- **Asymmetrische** e^+e^- -Collider → **Boost** des $B\bar{B}$ -Systems
→ bessere Rekonstruktion von **Zerfallslängen**(differenzen)
- Neutrale B-Mesonen: **Mischung** der starken Eigenzustände durch schwache Wechselwirkung → $B^0-\bar{B}^0$ -**Oszillationen**
- $B^0 \rightarrow J/\psi K^0_S$: **CP-Verletzung** in Interferenz aus Mischung und Zerfall

Kapitel 8.2

Physik am Hadron-Collider

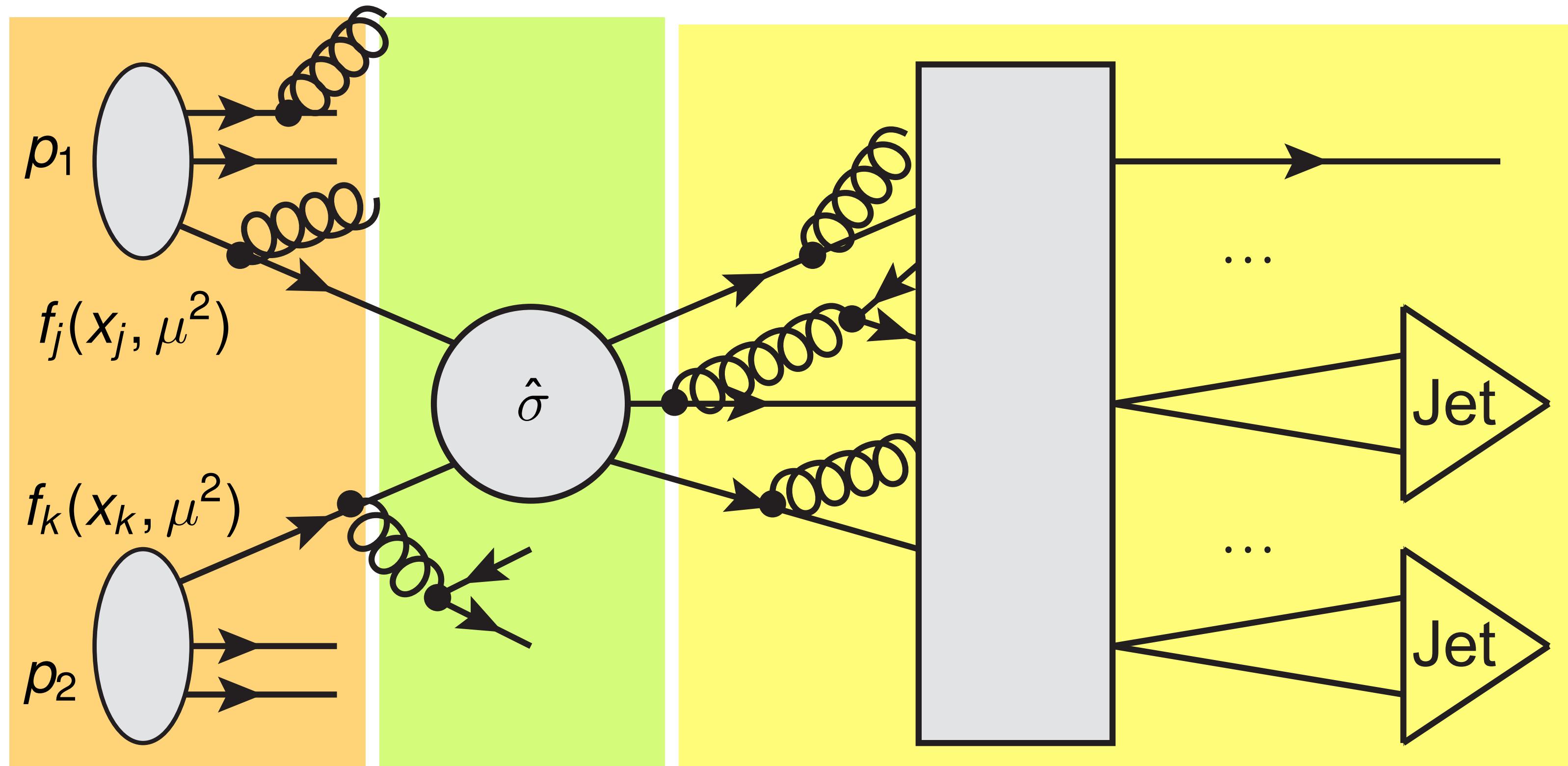
Hadron-Hadron-Kollisionen

- Hadron-Collider = **QCD-Maschine** → „Breitbandstrahl“ von Partonen
- Schwierigkeiten mit QCD-Rechnungen:
 - **Confinement:** Partonen immer in farbneutrale Hadronen eingebunden
 - **Asymptotische Freiheit:** quasi-freie Partonen bei hohen Energien
- Herausforderung: zuverlässige **Berechnung** messbarer Größen



QCD-Faktorisierung

Wirkungsquerschnitt = PDFs \otimes harter Prozess \otimes Hadronisierung



- Prozesse bei unterschiedlichen Energieskalen faktorisieren
- Bindung in Hadronen: einige 100 MeV
- Streuprozess: 10 GeV bis TeV

Hadron-Collider: Kinematik

- Impulsbruchteile x_1 und x_2 der Partonen in Hadronen unbekannt:
 - z-Boost des Schwerpunktsystems unbekannt → **transversale Größen**
 - **Transversalimpuls** (engl.: transverse momentum):

$$\vec{p}_T = \begin{pmatrix} p_x \\ p_y \end{pmatrix}, \quad p_T \equiv \sqrt{p_x^2 + p_y^2}$$

- Impulserhaltung in transversaler xy-Ebene:
 - Strahlteilchen vor Kollision: $p_T \approx 0$ → Teilchen i im Endzustand: $\sum_i \vec{p}_{T,i} \approx 0$
 - Falls Teilchen nicht beobachtet (z. B. Neutrinos): **fehlender Transversalimpuls** (oft auch: missing transverse energy, MET)

$$\vec{p}_T^{\text{miss}} = - \sum_j \vec{p}_{T,j} \quad j: \text{alle sichtbaren Teilchen}$$

Hadron-Collider: Kinematik

- **Rapidität y** : Maß für relativistische Geschwindigkeit (\rightarrow Übung)
- Definition in Teilchenphysik: Geschwindigkeit parallel zur Strahlachse

$$\beta_z = \frac{v_z}{c} = \frac{p_z c}{E} \equiv \tanh y \quad \rightarrow \quad y = \tanh^{-1} \left(\frac{p_z c}{E} \right) = \frac{1}{2} \ln \left(\frac{E + p_z c}{E - p_z c} \right)$$

- Man kann zeigen: **Rapiditätsverteilungen** dN/dy (Zahl der produzierten Teilchen pro y -Intervall) **invariant** unter Lorentz-Boosts entlang der z -Achse
- **Pseudorapidität η** : Näherung der Rapidität für $pc \gg mc^2$ ($\rightarrow E \approx pc$)

$$y \underset{pc \gg mc^2}{\approx} \frac{1}{2} \ln \left(\frac{p(1 + \cos \theta)}{p(1 - \cos \theta)} \right) = \frac{1}{2} \ln \frac{\cos^2(\theta/2)}{\sin^2(\theta/2)} = -\ln \tan \frac{\theta}{2} \equiv \eta$$

- Nur von **Polarwinkel θ** abhängig (nicht von Massen), **nicht** lorentzinvariant

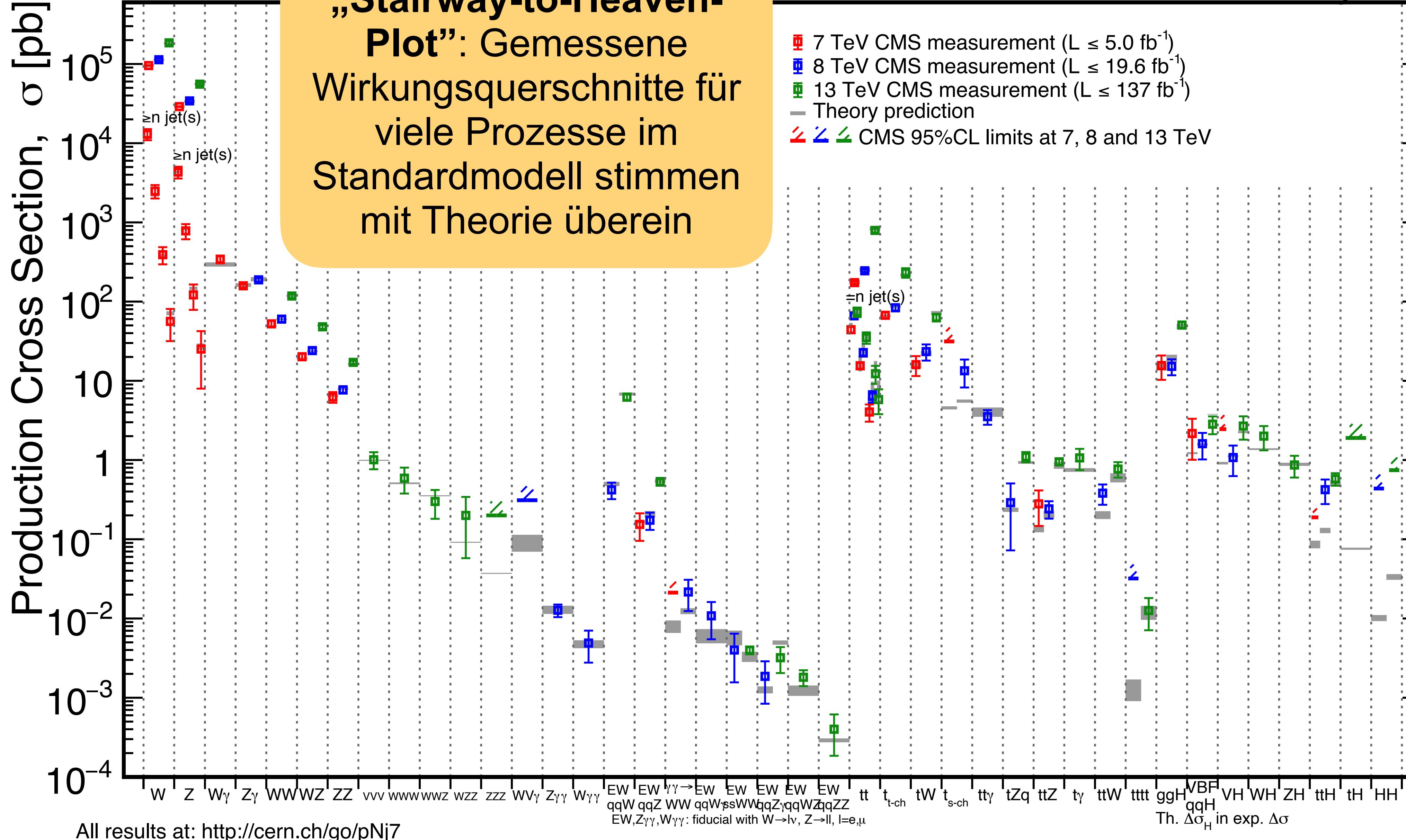
Messung des Wirkungsquerschnitts

- Motivation: Test der QCD bei höchsten Energien
- Erinnerung: Zusammenhang von Wirkungsquerschnitt mit Zahl der Ereignisse und integrierter Luminosität

$$\sigma = \frac{N^{\text{obs}} - N^{\text{bkg}}}{\int \mathcal{L} dt \cdot \varepsilon}$$

- Bestandteile der Messung eines Wirkungsquerschnitts:
 - Zahl der beobachteten Ereignisse N^{obs} : aus Daten
 - Erwarteter Untergrund N^{bkg} : aus Simulation und Daten
 - Integrierte Luminosität $\int L dt$ (= Größe des Datensatzes): aus Daten
 - Nachweiseffizienz ε : aus Simulation und Daten

„Stairway-to-Heaven-Plot“: Gemessene Wirkungsquerschnitte für viele Prozesse im Standardmodell stimmen mit Theorie überein

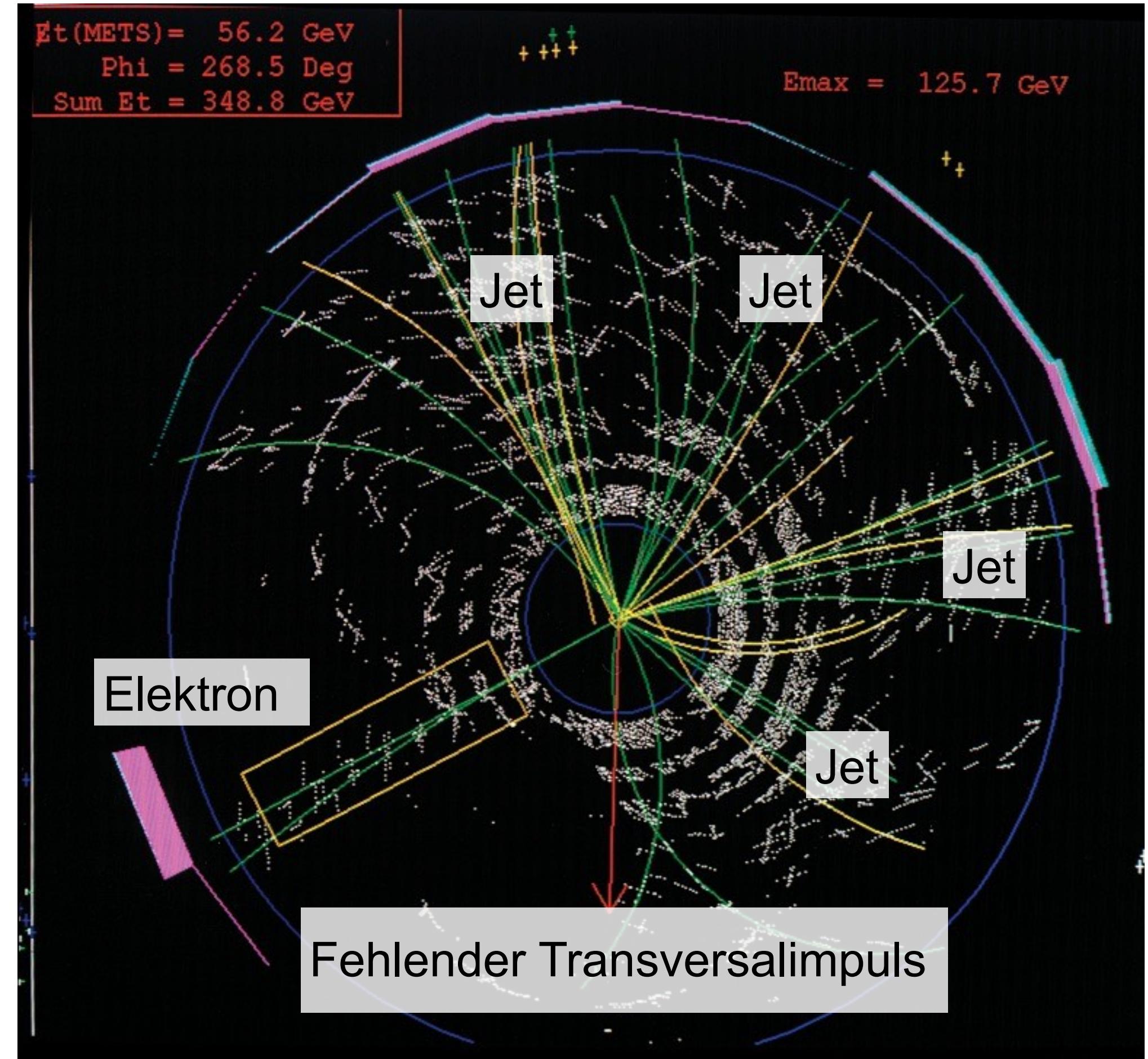


Top-Quark-Antiquark-Produktion

■ Forschungsgeschichte:

- **GIM-Mechanismus (1970) und CKM-Matrix (1973): 3. Quarkfamilie**
- Entdeckung des Υ (1977): **Bottom-Quark** als Isospin-Partner
- **Direkte Suchen nach Top-Quarks (1980er Jahre) → erfolglos**
- Indirekte Hinweise: **elektroschwacher Fit** an Präzisionsdaten (1990er Jahre)
- **Entdeckung am Tevatron (1995)**
- Überraschung: Top-Quark ca. **40-mal massiver** als Bottom-Quark

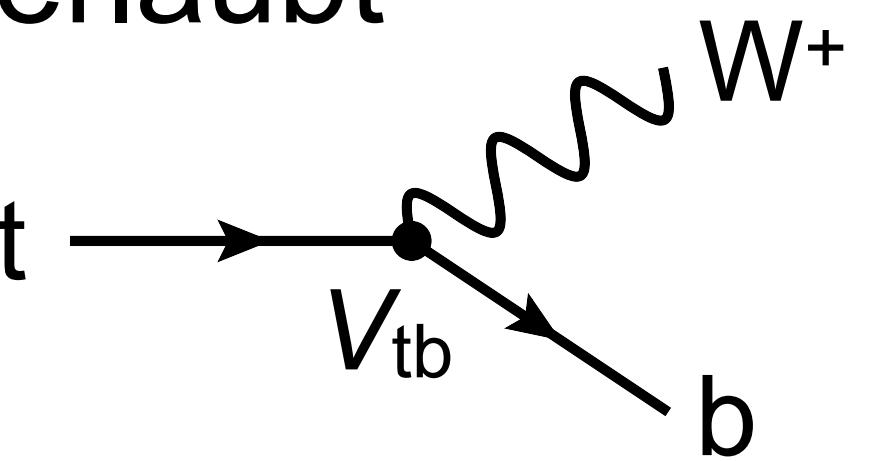
Früher Top-Quark-Kandidat



CDF-Experiment, 24.09.1992

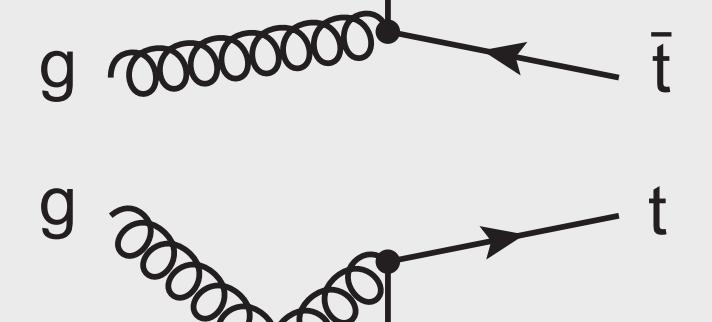
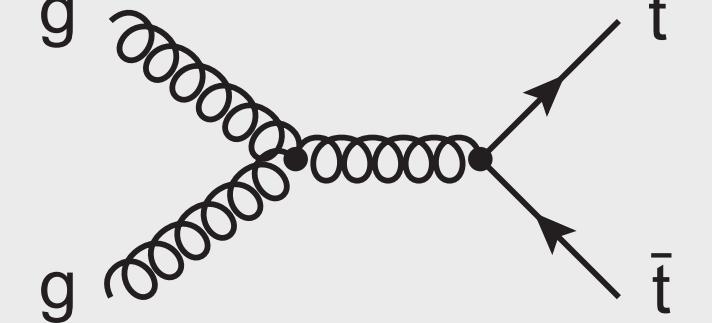
Top-Quark-Antiquark-Produktion

- $t\bar{t}$ -Paarproduktion: **QCD-Prozess** → Truth-Erhaltung
- Top-Quark-Zerfall: **elektroschwacher Prozess**
 - Masse $m_t > m_W + m_b$ und CKM-Matrixelement $|V_{tb}| \approx 1$: Zerfall in **reelles** W-Boson und b-Quark erlaubt
→ $B(t \rightarrow Wb) \approx 100\%$
- Sehr **kurze Lebensdauer** ($\tau \approx 5 \cdot 10^{-25} \text{ s}$)
→ keine gebundenen Zustände
- Auch möglich: elektroschwache Produktion **einzelner** Top-Quarks



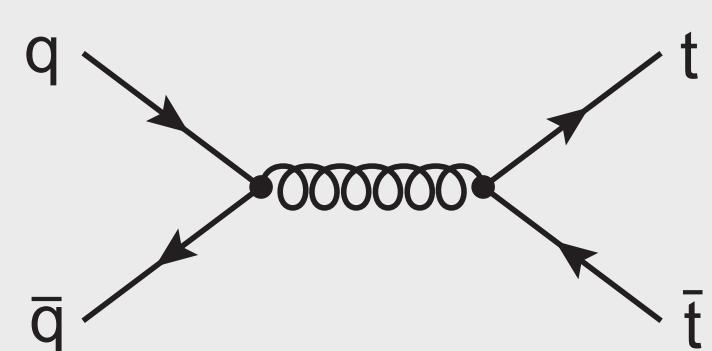
Gluon-Gluon-Fusion

(LHC: 80-90%)



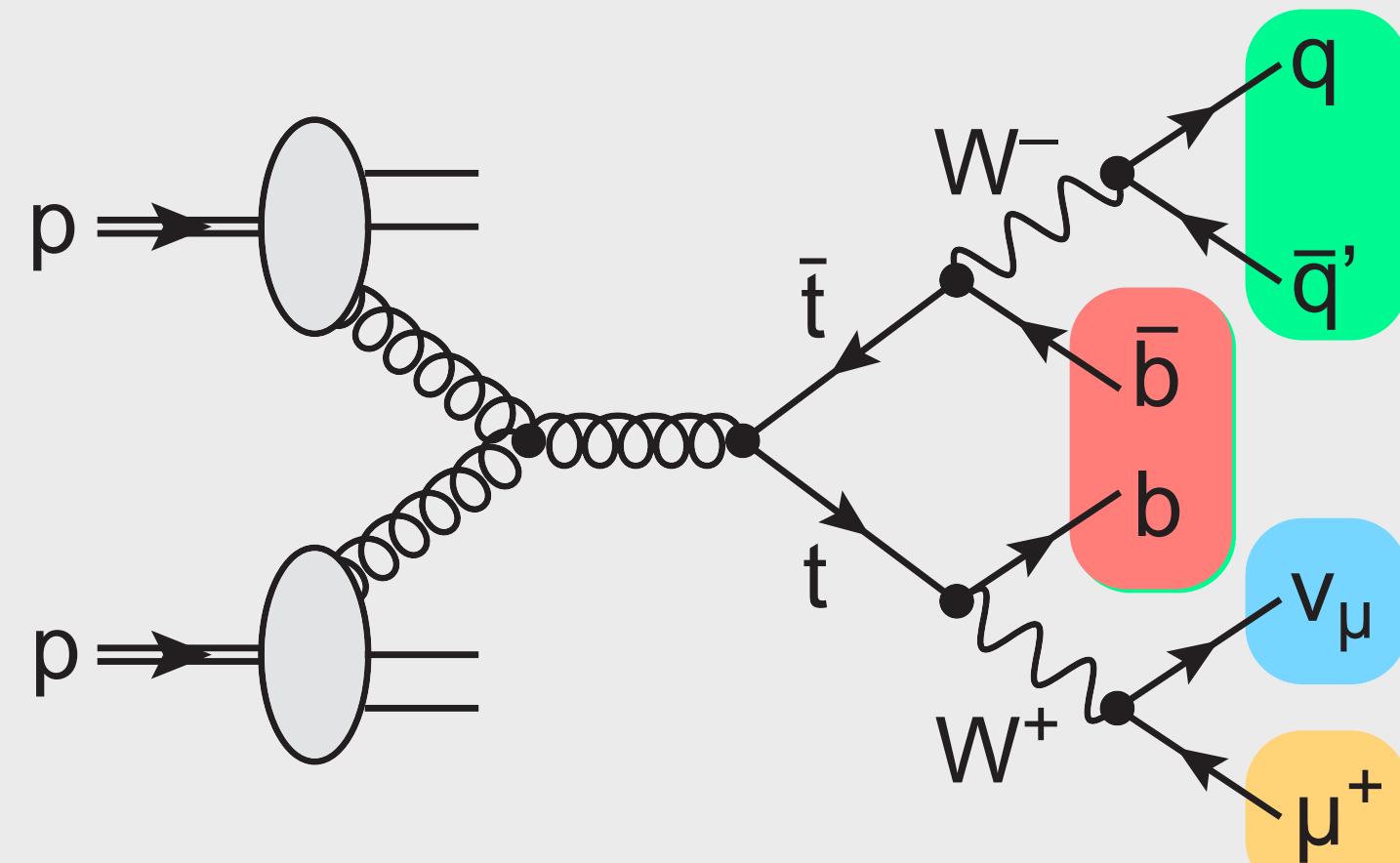
Quark-Antiquark-Annihilation

(LHC: 20-10%)



Nachweis von Top-Quarks

Top-Quark-Rekonstruktion



Geladenes Lepton (e oder μ)

Neutrino: fehlender Transversalimpuls

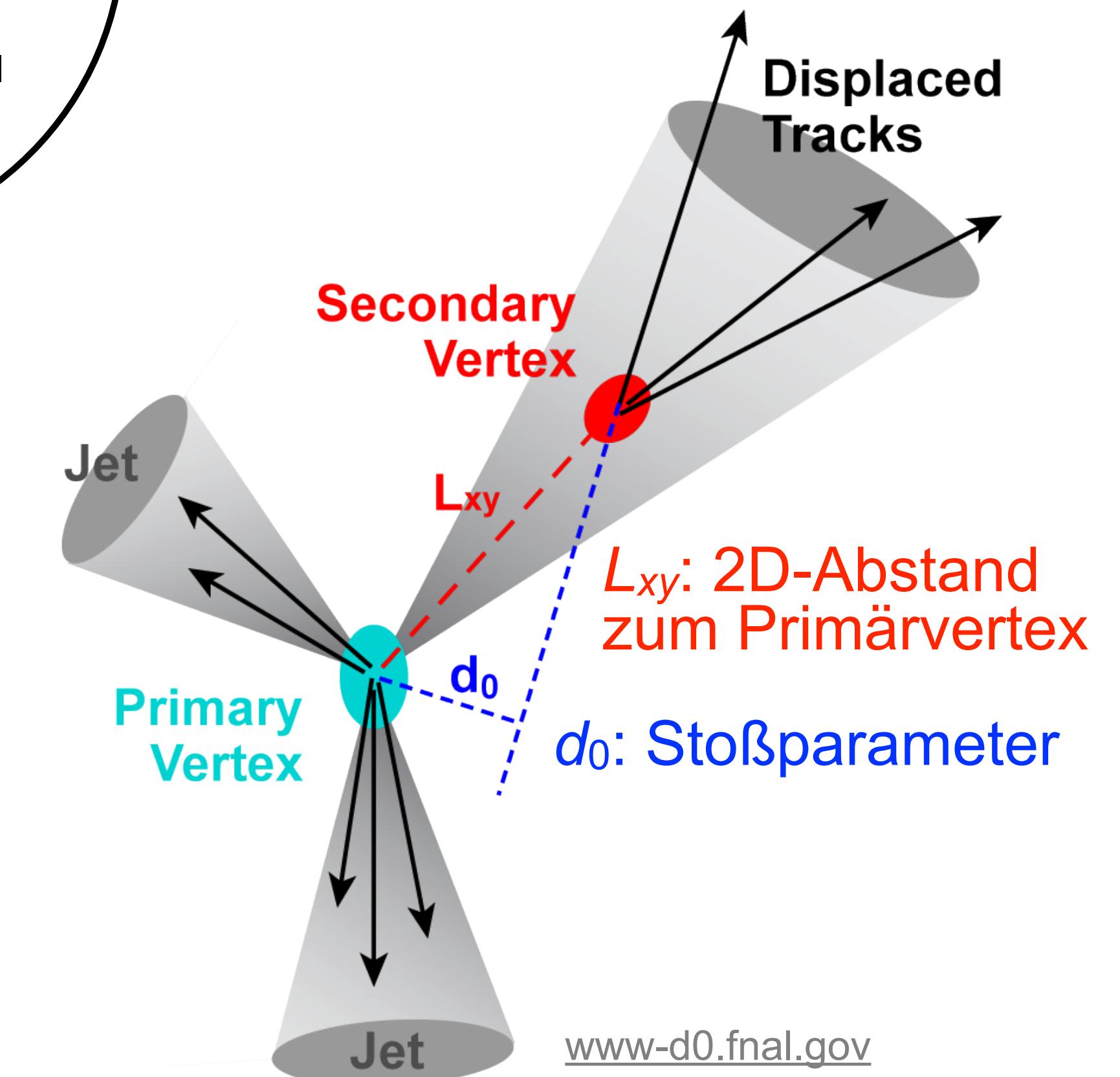
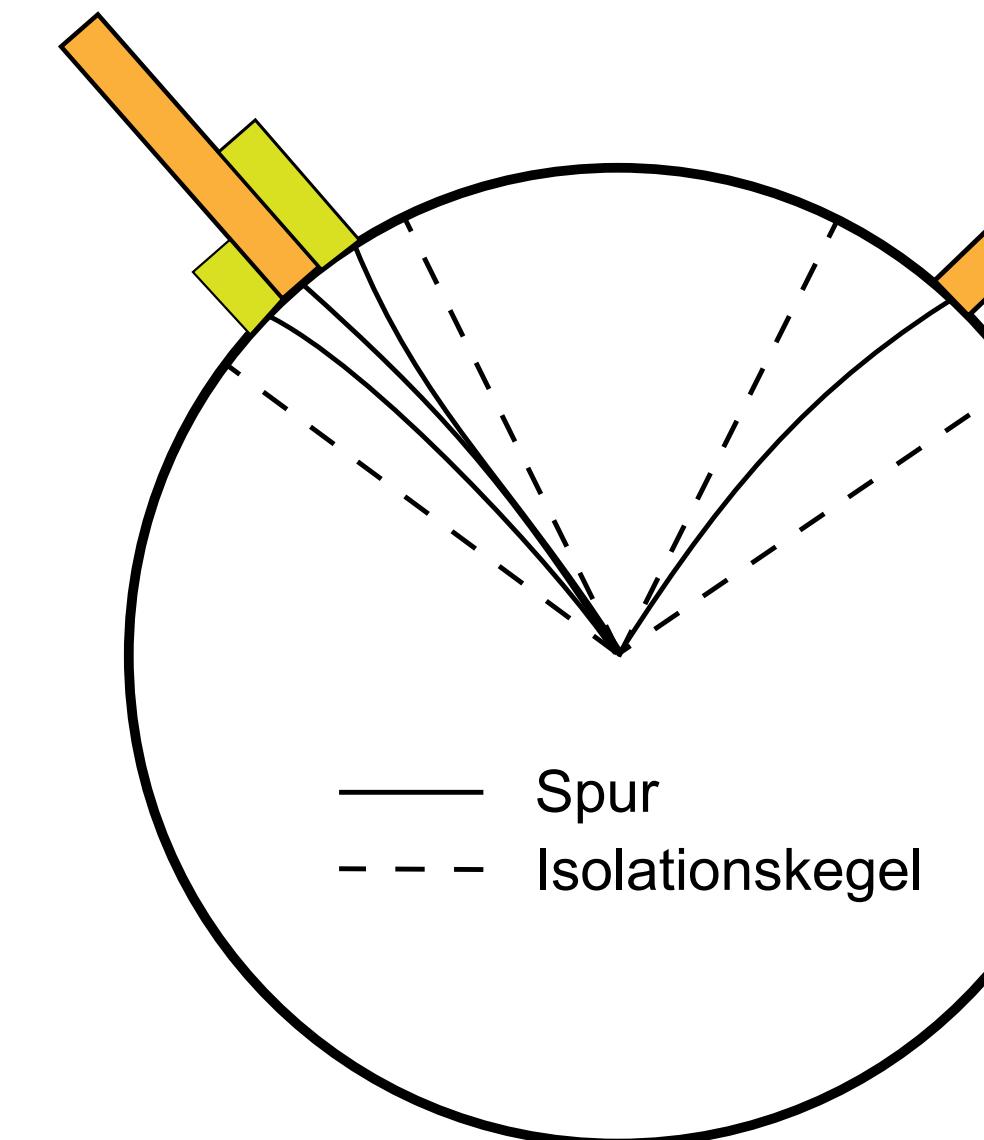
4 Jets aus Quarks

2 der Jets aus B-Zerfällen: b-Tag

- $t\bar{t}$ -Paar: mehrere Zerfallskanäle, abhängig von **Zerfällen der W-Bosonen** (2/3 in Hadronen, 1/3 in geladenes Lepton + Neutrino)
- Beispiel: **Lepton+Jets-Kanal**
 - Eines der W-Bosonen: $W \rightarrow e\nu / \mu\nu$
 - Eines der W-Bosonen: $W \rightarrow q\bar{q}'$
- Rekonstruktion: **gesamter Detektor** benötigt

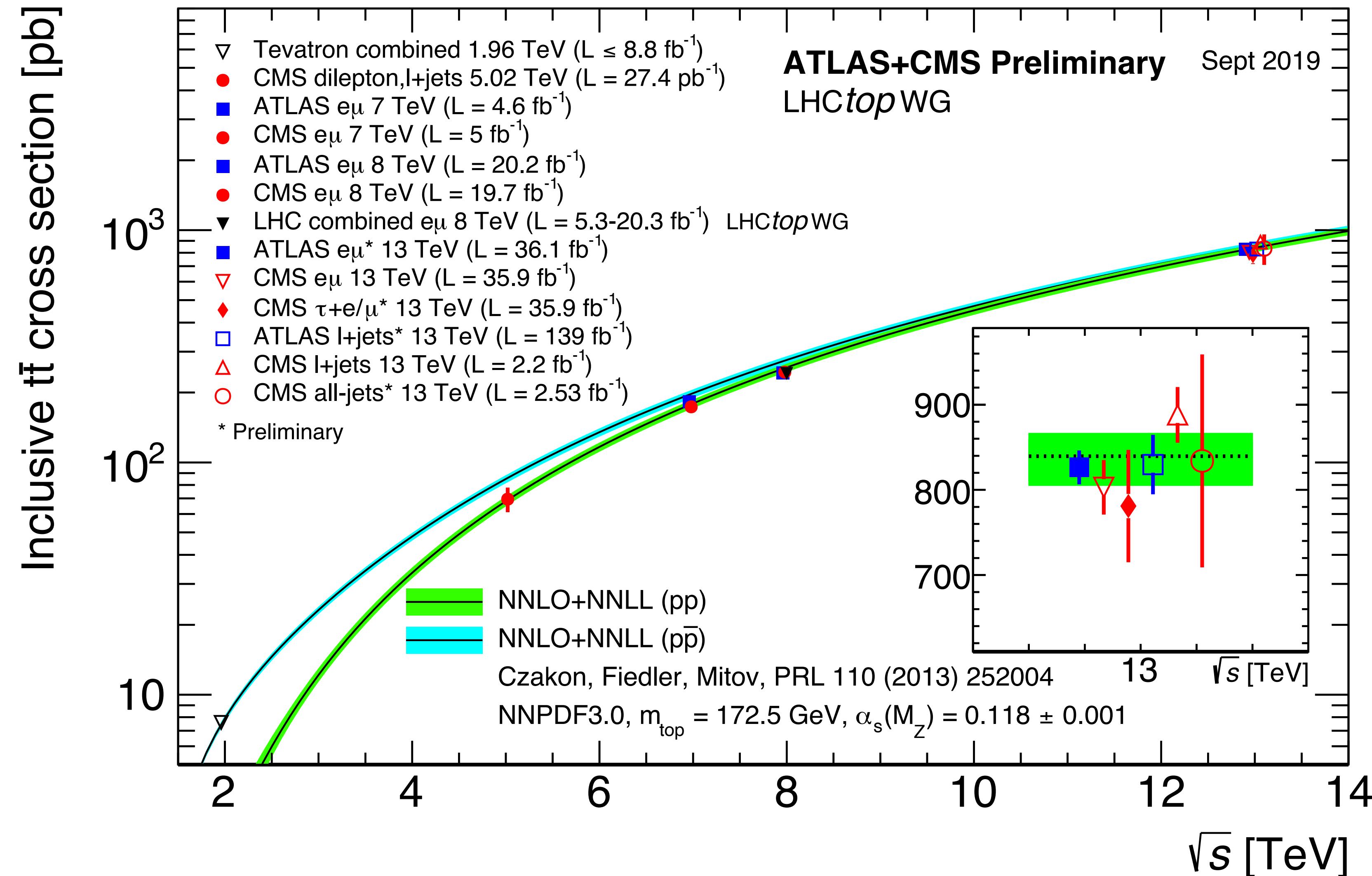
Rekonstruktion

- Leptonen aus W- (und Z-) Zerfällen: **isoliert** und mit hohem Transversalimpuls
- Jets = Bündel von Hadronen:
 - **Sequenzielle Rekombinationsalgorithmen**
(LHC: Anti-kt-Algorithmus)
 - Spezialfall B-Jets = Jets aus B-Hadronen:
lange Lebensdauer (1,5 ps) wegen CKM-Unterdrückung ($|V_{cb}| \approx 0,04$)
→ **versetzte** Sekundärvertizes
→ **B-Tagging-Algorithmen**



www-d0.fnal.gov

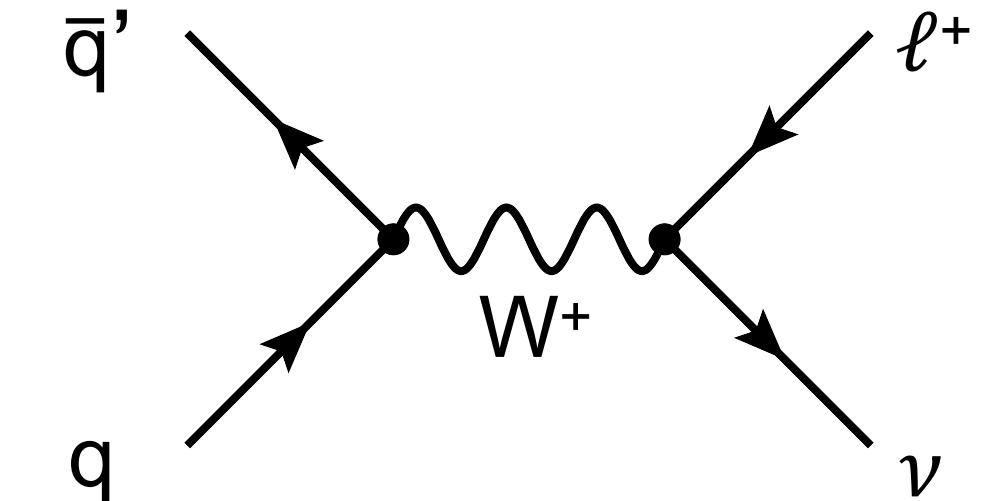
Top-Paarproduktion: aktueller Stand



<https://twiki.cern.ch/twiki/bin/view/LHCPhysics/LHCTopWGSummaryPlots>

W-Boson-Masse am Hadron-Collider

- Produktion/Zerfall von W-Bosonen am Hadron-Collider:
 - Produktion von W-Bosonen: **Drell-Yan-Prozess** (vgl. W/Z-Entdeckung)
 - Für Präzisionsmessungen: **leptonischer Zerfall** $W \rightarrow \ell\nu$: isoliertes Lepton und fehlender Transversalimpuls durch Neutrino \rightarrow gut rekonstruierbar
- Messung der **W-Boson-Masse** am Hadron-Collider:
 - Annahme: fehlender Transversalimpuls in Ereignissen mit W-Bosonen nur durch transversale Komponente des Neutrinoimpulses $p_{T\nu}$
 - $p_{z\nu}$ unbekannt: **keine vollständige Rekonstruktion** der invarianten W-Boson-Masse aus Zerfallsprodukten möglich
 - Alternative: **transversale** Größen mit guter Korrelation zur W-Boson-Masse



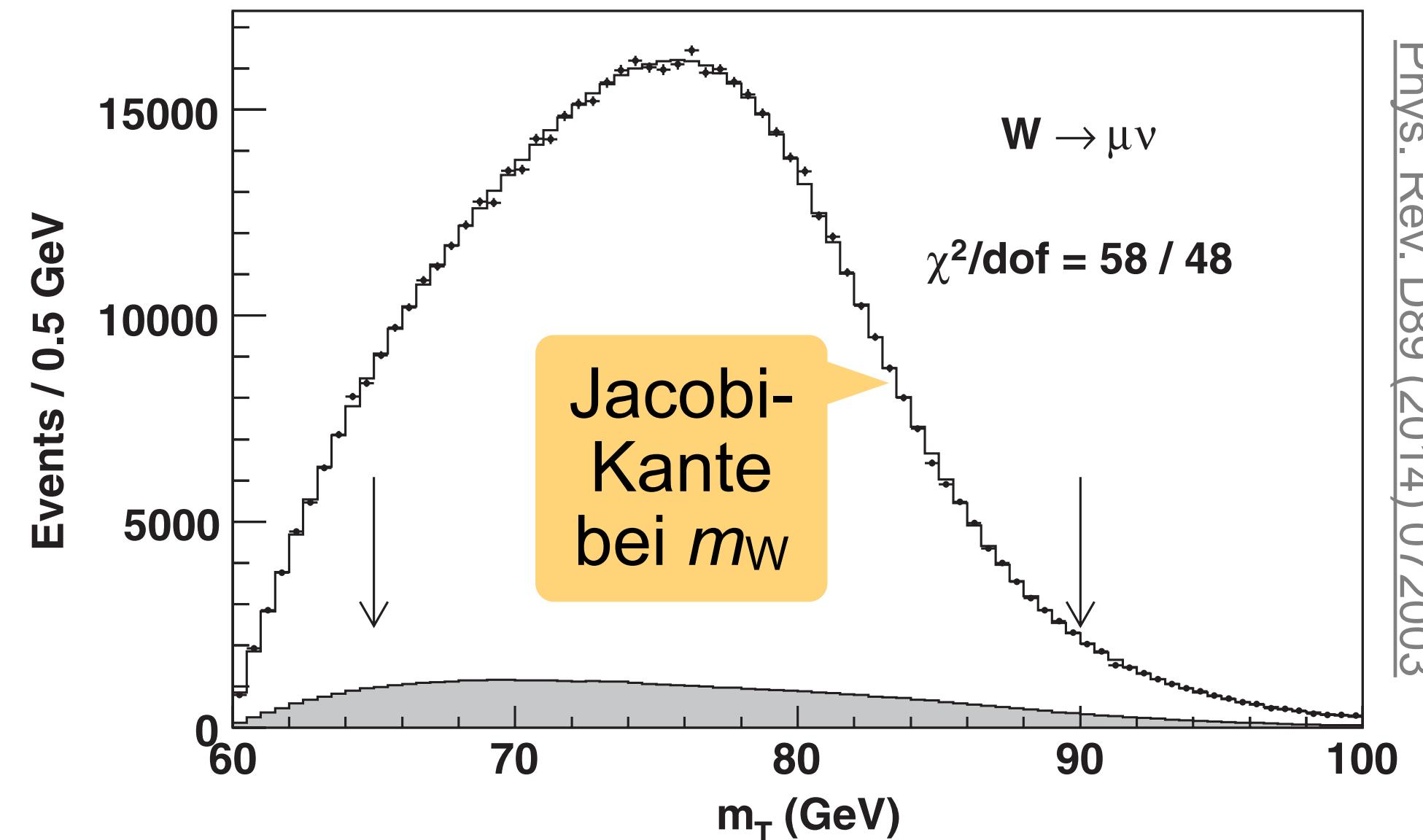
W-Boson-Masse am Hadron-Collider

- Betrachte differenziellen Wirkungsquerschnitt als Funktion von
 - Transversalimpulse des Leptons p_T^ℓ und des Neutrinos p_T^ν
 - Transversale Masse des W-Bosons:

$$m_T^2 \equiv (E_T^\ell + E_T^\nu)^2 - (\vec{p}_T^\ell + \vec{p}_T^\nu)^2 \approx 2 |\vec{p}_T^\ell| |\vec{p}_T^\nu| (1 - \cos \Delta\phi_{\ell\nu})$$

Winkel zwischen ℓ und ν

- Skizze der Analyse:
 - Signatur: Flanke im Wirkungsquerschnitt
→ **Jacobi-Kante**
 - **Likelihood-Anpassung von Schablonen**
(engl.: template fit) für unterschiedliche m_W
 - Einzelmessungen an Tevatron und LHC:
genauer als LEP-Kombination (ca. 19 MeV)



Kurze Zusammenfassung

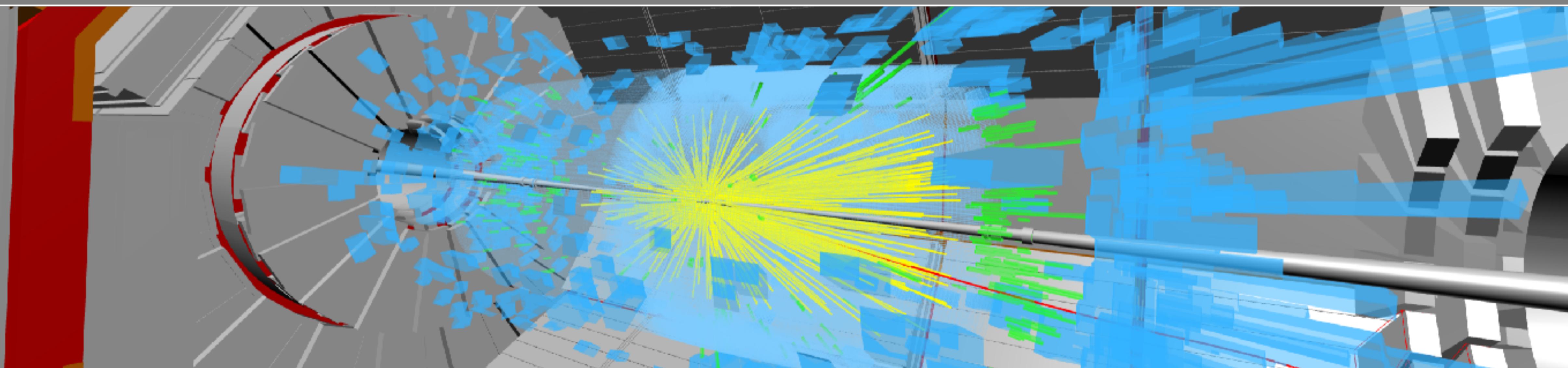
- Grundlagen der Physik am **Hadron-Collider**:
 - Kinematik: **transversale** Größen (z. B. Transversalimpuls, fehlender Transversalimpuls, transversale Masse), **(Pseudo-)Rapidity**
 - Berechnung von Wirkungsquerschnitten: **QCD-Faktorisierung** (PDFs \otimes harter Streuprozess \otimes Hadronisierung)
 - Messung von Wirkungsquerschnitten:
$$\sigma = \frac{N^{\text{obs}} - N^{\text{bkg}}}{\int \mathcal{L} dt \cdot \varepsilon}$$
- Beispiel 1: **Produktion von Top-Quarks**
 - Rekonstruktion von **isolierten Leptonen** und **Jets**
 - Identifikation von **Jets**, besonders Jets aus B-Hadronen („B-Tagging“)
- Beispiel 2: **Präzisionsmessung der Masse des W-Bosons**

Moderne Experimentalphysik III – Teilchen und Hadronen

Karlsruher Institut für Technologie
Sommersemester 2019 – 17. Vorlesung (Teil 2)

ULRICH HUSEMANN, KATHRIN VALERIUS

Bildquelle: CMS



Kurze Wiederholung

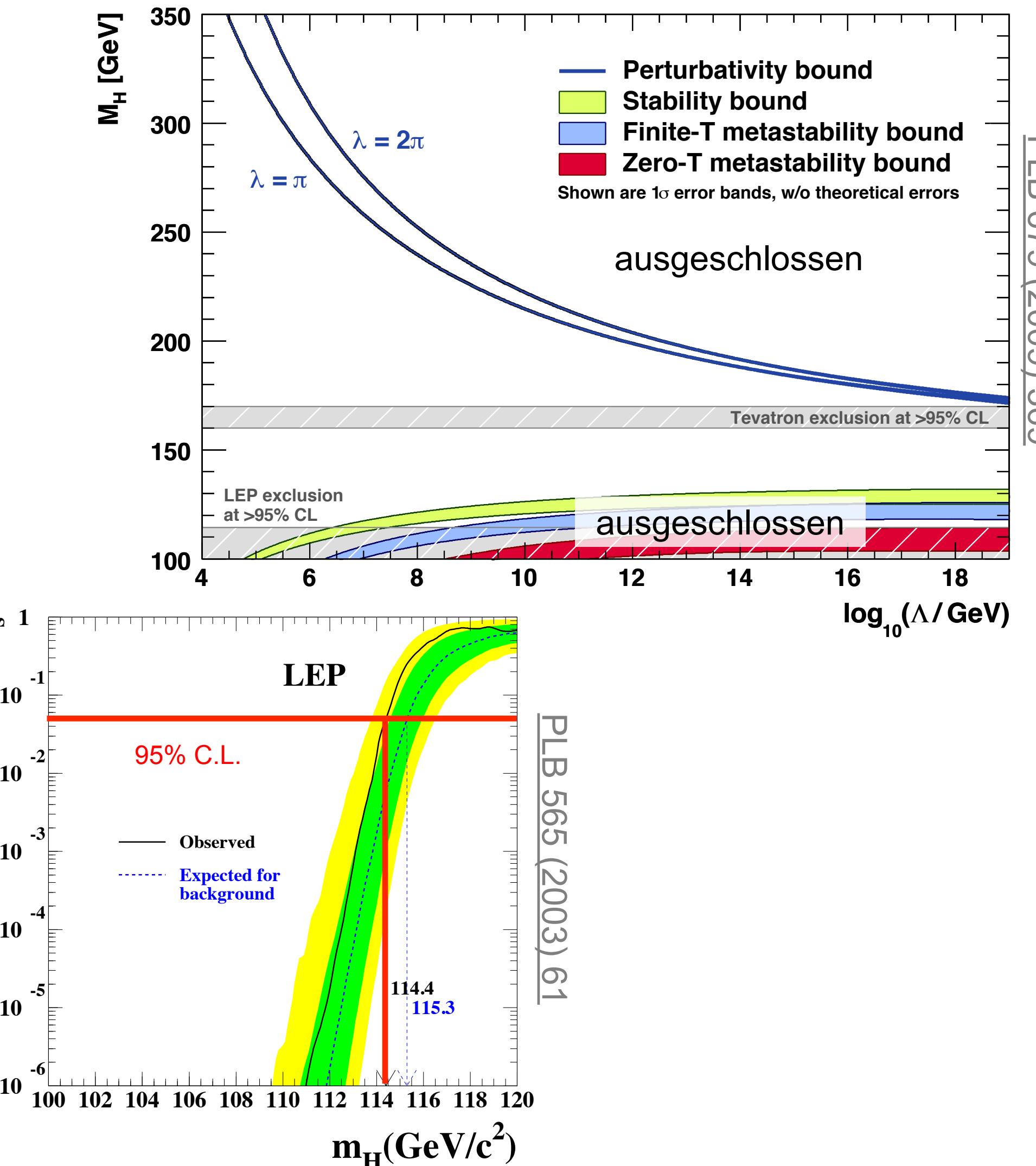
- Grundlagen der Physik am **Hadron-Collider**:
 - Kinematik: **transversale** Größen (z. B. Transversalimpuls, fehlender Transversalimpuls, transversale Masse), (**Pseudo-)Rapidity**
 - Berechnung von Wirkungsquerschnitten: **QCD-Faktorisierung** (PDFs \otimes harter Streuprozess \otimes Hadronisierung)
 - Messung von Wirkungsquerschnitten:
$$\sigma = \frac{N^{\text{obs}} - N^{\text{bkg}}}{\int \mathcal{L} dt \cdot \varepsilon}$$
- Beispiel 1: **Produktion von Top-Quarks**
 - Rekonstruktion von **isolierten Leptonen** und **Jets**
 - Identifikation von **Jets**, besonders Jets aus B-Hadronen („B-Tagging“)
- Beispiel 2: **Präzisionsmessung der Masse des W-Bosons**

Kapitel 8.2

Physik am Hadron-Collider

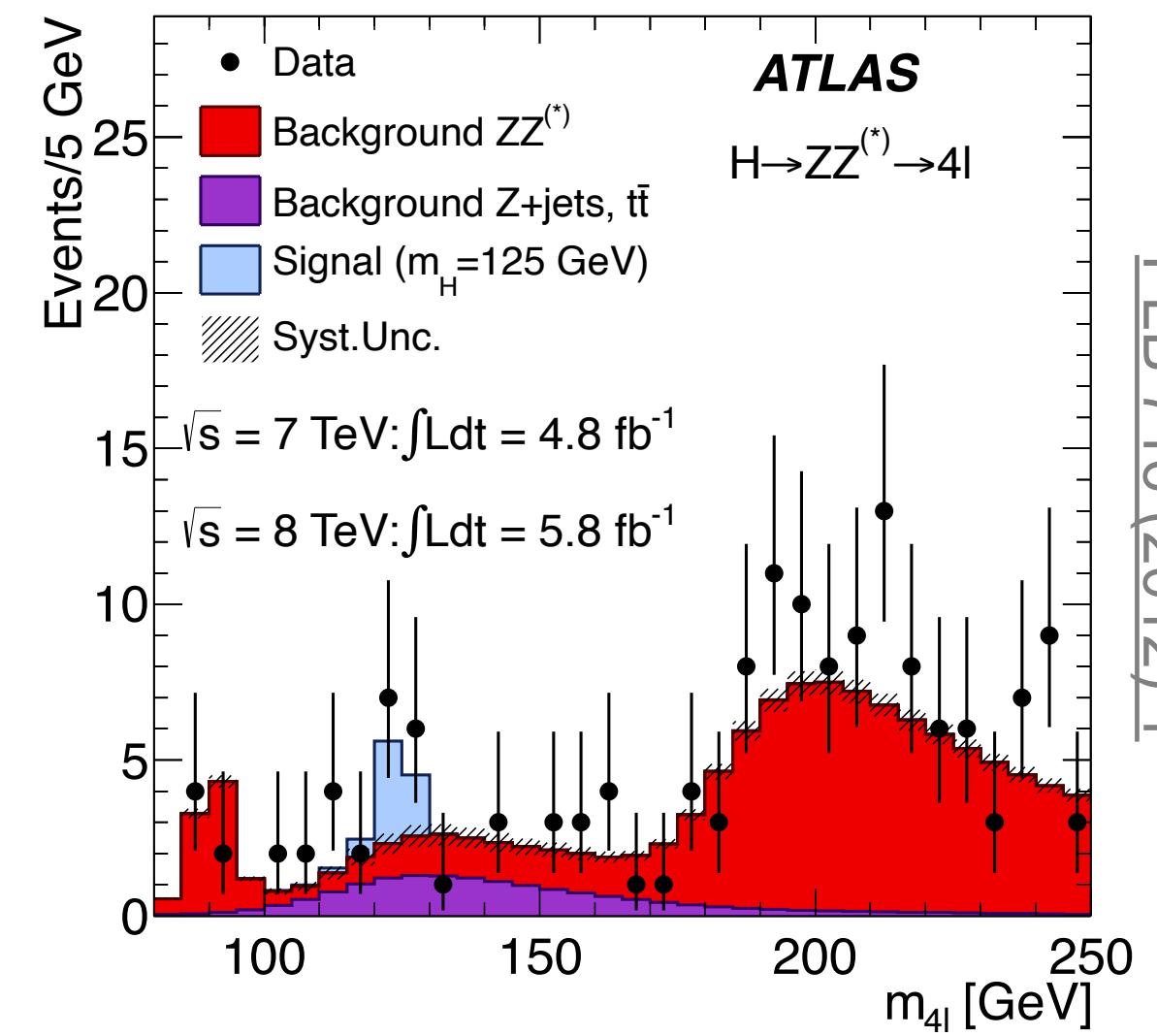
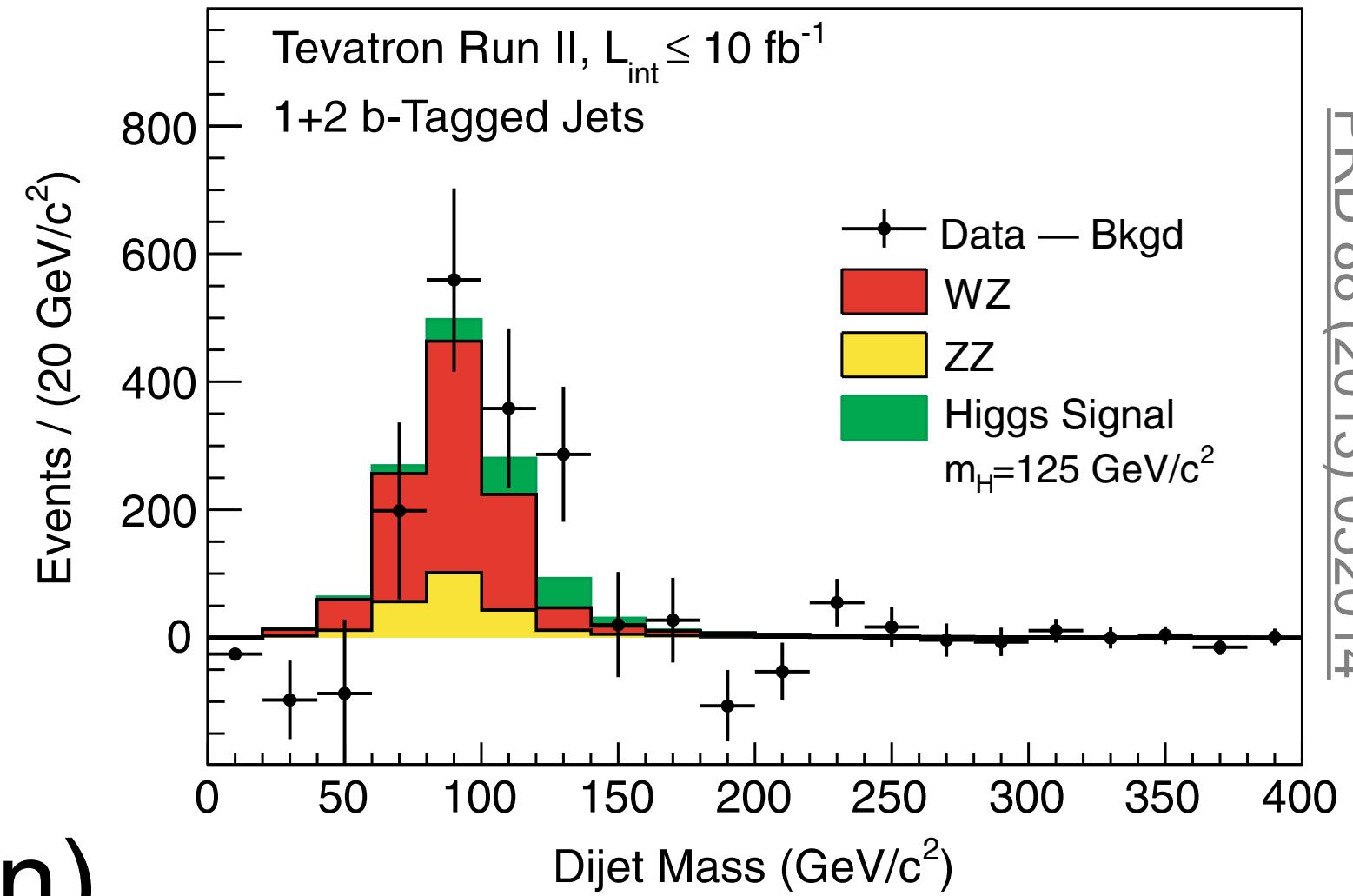
Überblick: Higgs-Boson-Physik

- **Forschungsgeschichte (Teil 1):**
- Vor Entdeckung: Masse des Higgs-Bosons **einiger unbekannter Parameter** des Standardmodells
- **Theoretische Erwartungen:**
 $100 \text{ GeV}/c^2 \lesssim m_H \lesssim 850 \text{ GeV}/c^2$
- Direkte Suche bei **LEP** (bis 2000):
 $m_H > 115 \text{ GeV}/c^2$ (95% C.L.)
- Anpassung an **Präzisionsdaten** (bis 2011): $m_H < 161 \text{ GeV}/c^2$ (95% C.L.)



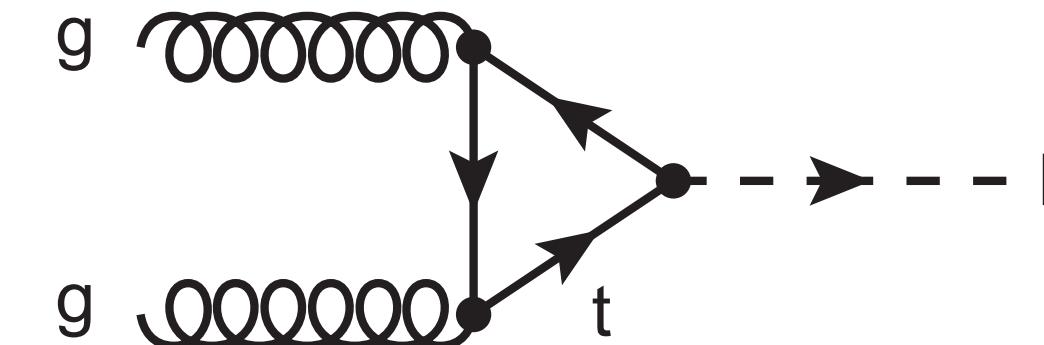
Überblick: Higgs-Boson-Physik

- Forschungsgeschichte (Teil 2):
 - Direkte Suche am **Tevatron** (bis 2011):
Anzeichen für Higgs-Boson mit m_H zwischen $115 \text{ GeV}/c^2$ und $145 \text{ GeV}/c^2$
 - **Higgs-Entdeckung am LHC** (2012):
signifikantes Signal (fünf Standardabweichungen)
nur in **Kombination** mehrerer Zerfallskanäle
($H \rightarrow \gamma\gamma$, $H \rightarrow ZZ$, $H \rightarrow WW$)
 - Ab 2012: ist das gefundene Teilchen das **Higgs-Boson des Standardmodells?** → Messungen von Masse, Quantenzahlen, Kopplungen an Fermionen und Bosonen

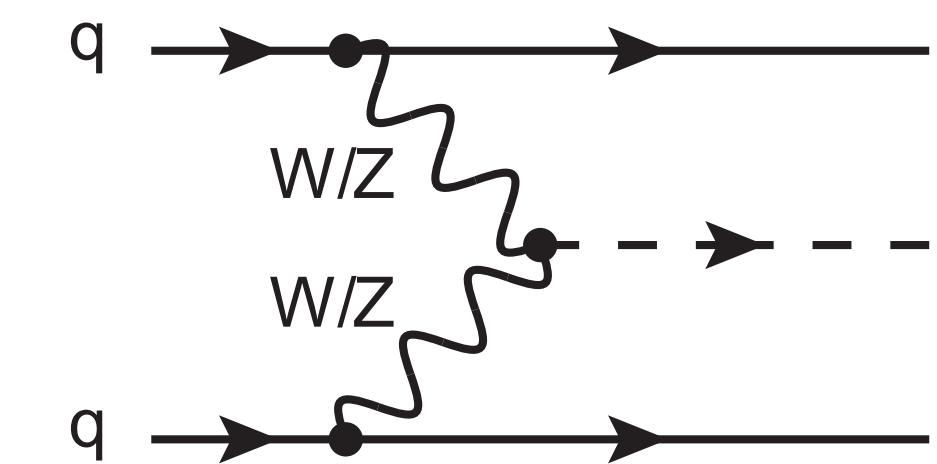


Higgs-Boson-Produktion

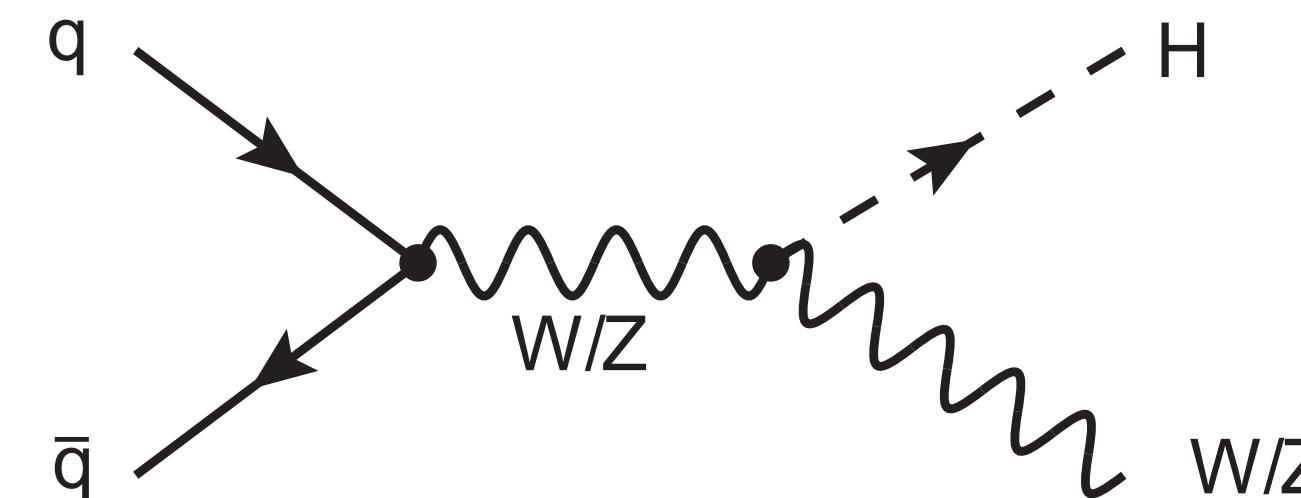
Gluon-Gluon-Fusion



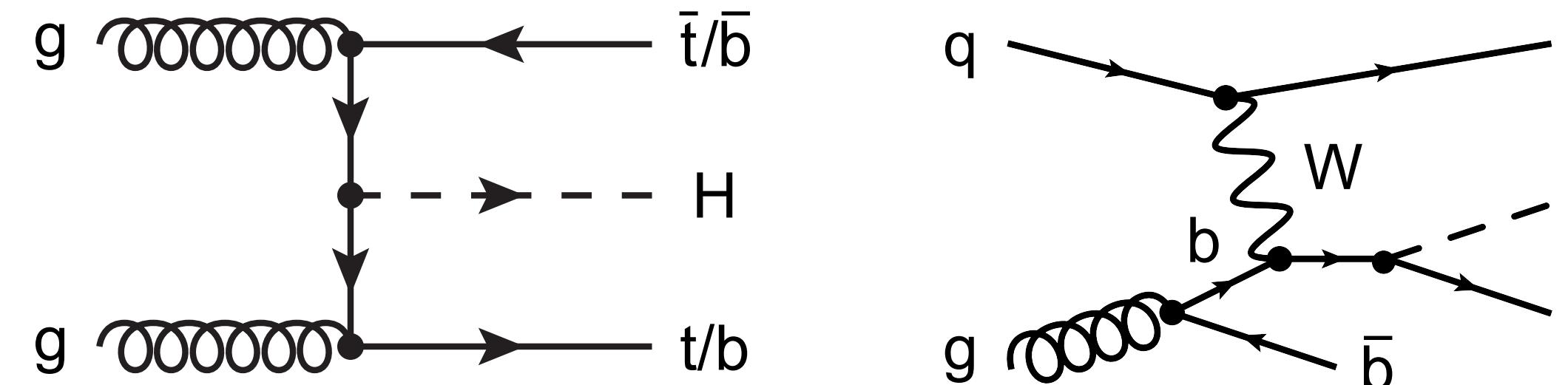
Vektorboson-Fusion



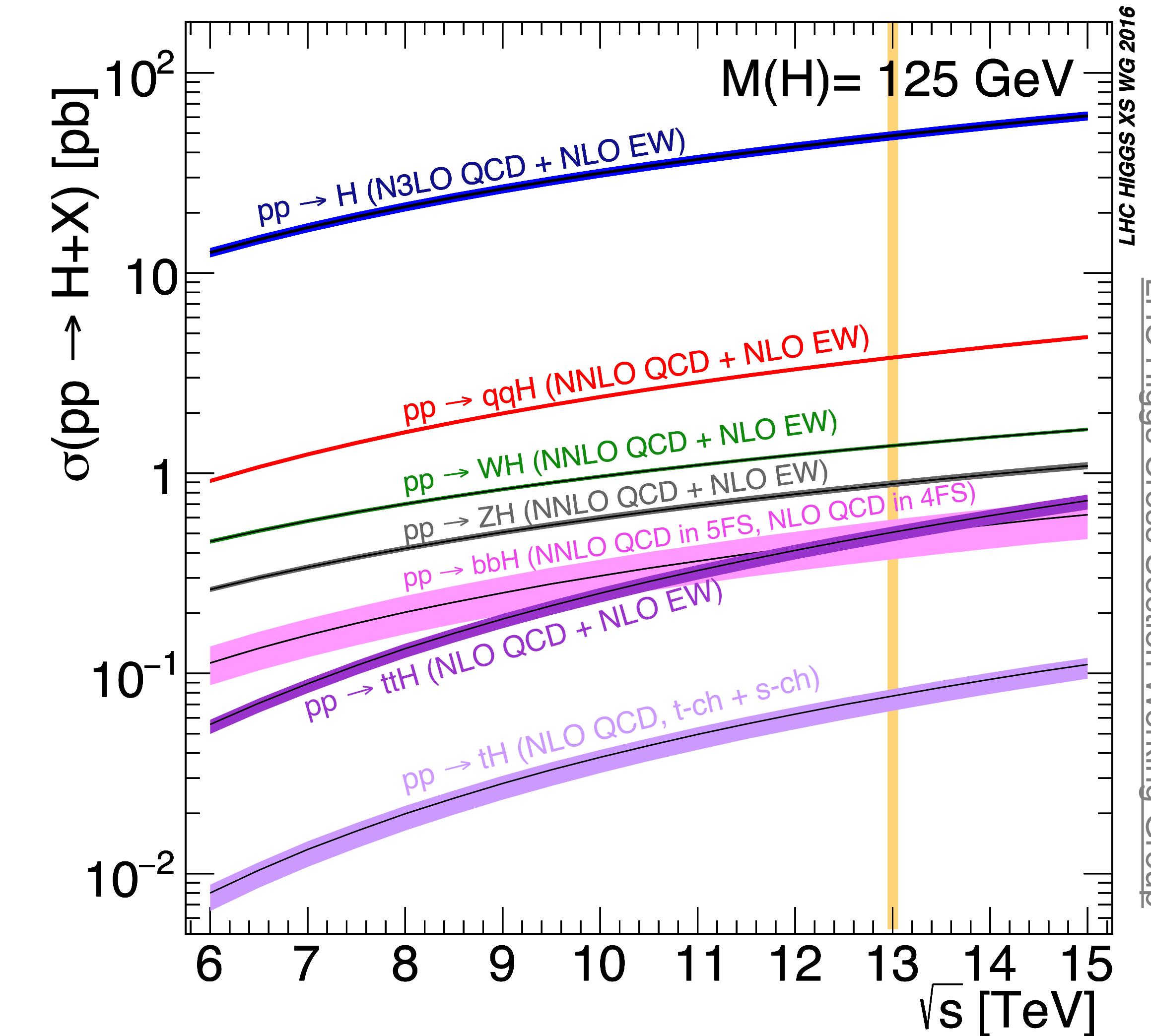
Assozierte Produktion mit W und Z



Assozierte Produktion mit t und b

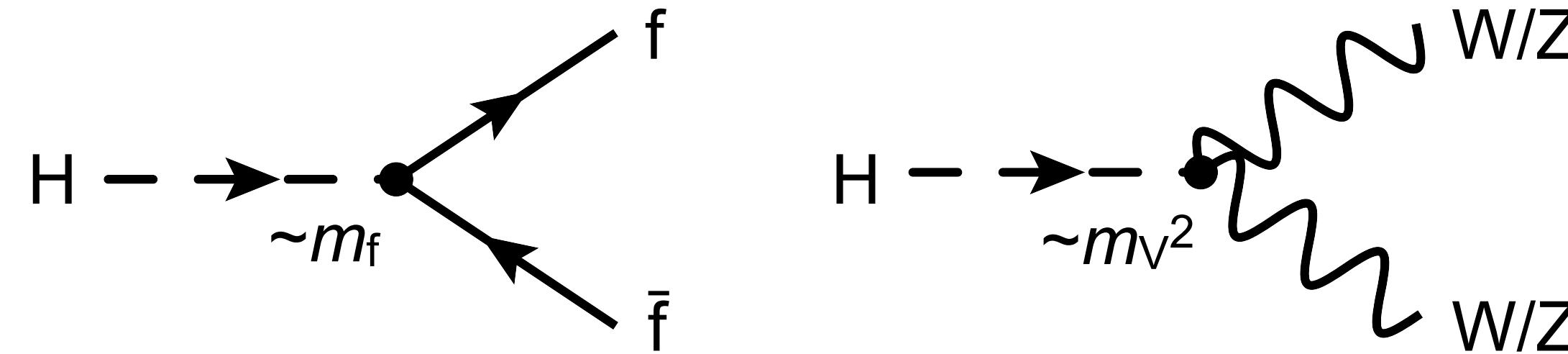


Wirkungsquerschnitt für Higgs-Boson-Produktion

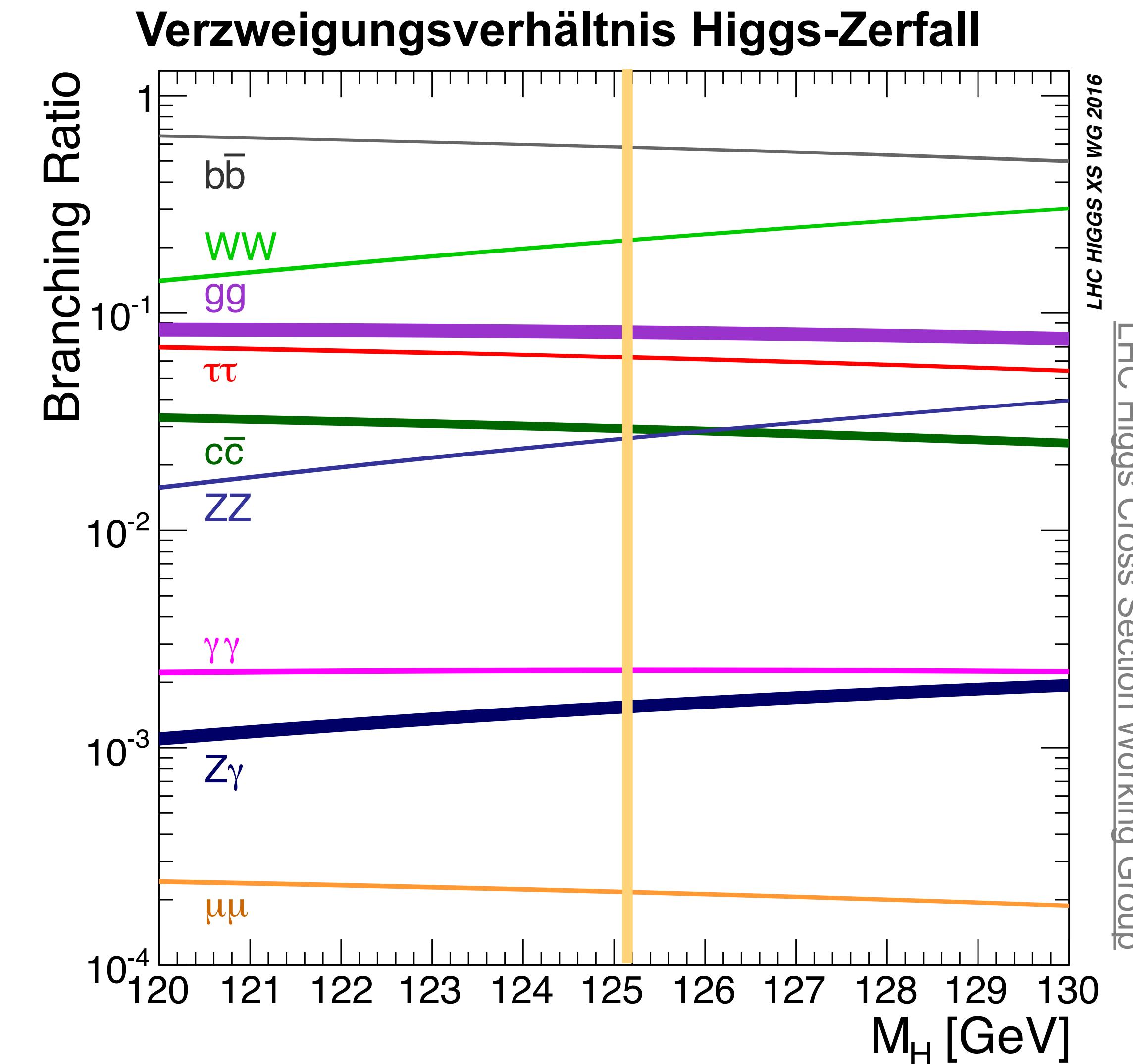


Higgs-Boson-Zerfall

- Massive Teilchen: direkte Kopplung ans Higgs-Boson

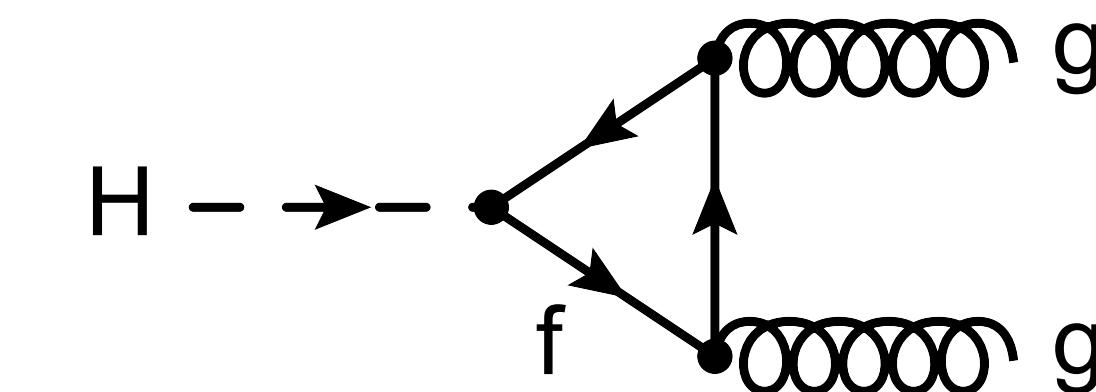


- Höchstes Verzweigungsverhältnis für massivstes kinematisch erlaubtes Teilchen ($\rightarrow b$ -Quark)
- WW und ZZ: unterhalb der Produktionsschwelle für reelle WW/ZZ-Paare ($2 m_{W/Z}$)
 \rightarrow ein W- bzw. Z-Boson virtuell

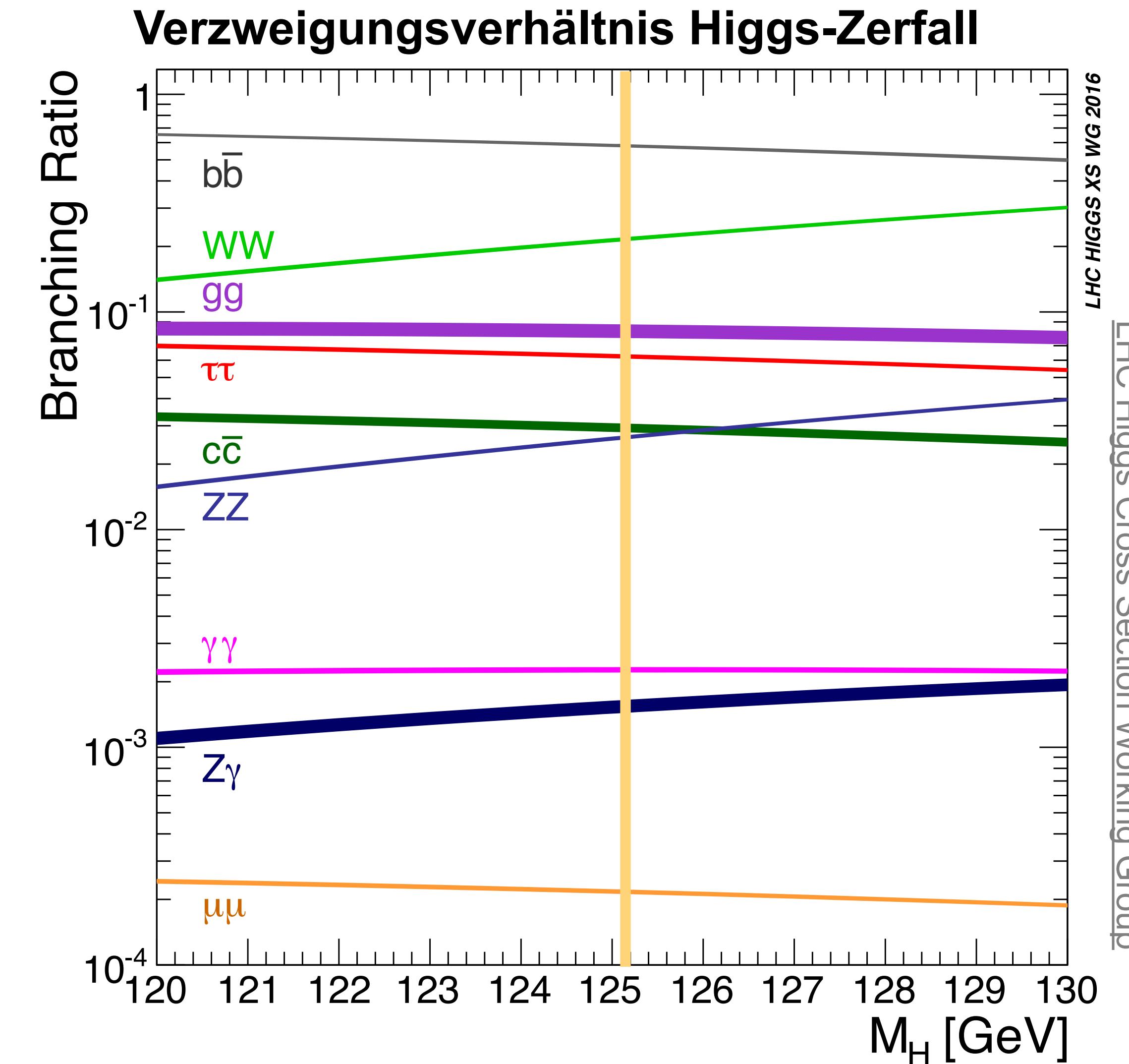
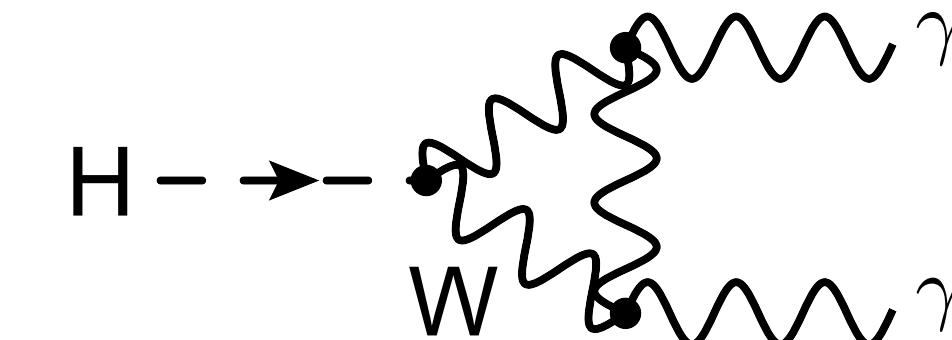
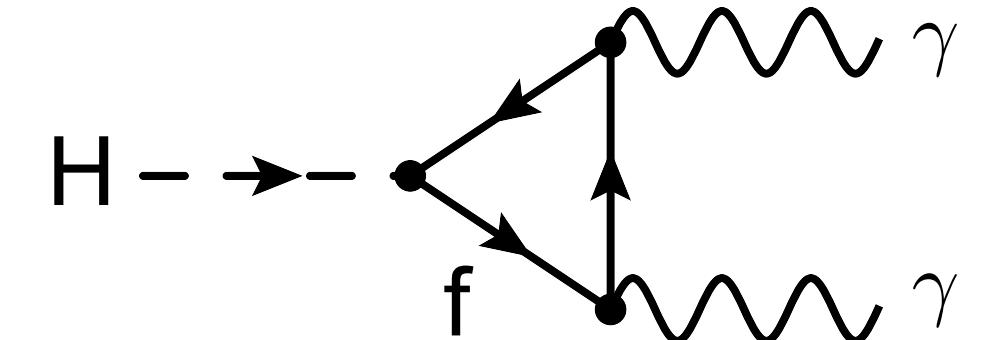


Higgs-Boson-Zerfall

- Masselose Teilchen: keine direkte Kopplung ans Higgs
- Kopplung: **Schleife** mit virtuellen Fermionen (Top-Quark bevorzugt) oder W-Bosonen
- Gluonen: nur Fermion-Schleife

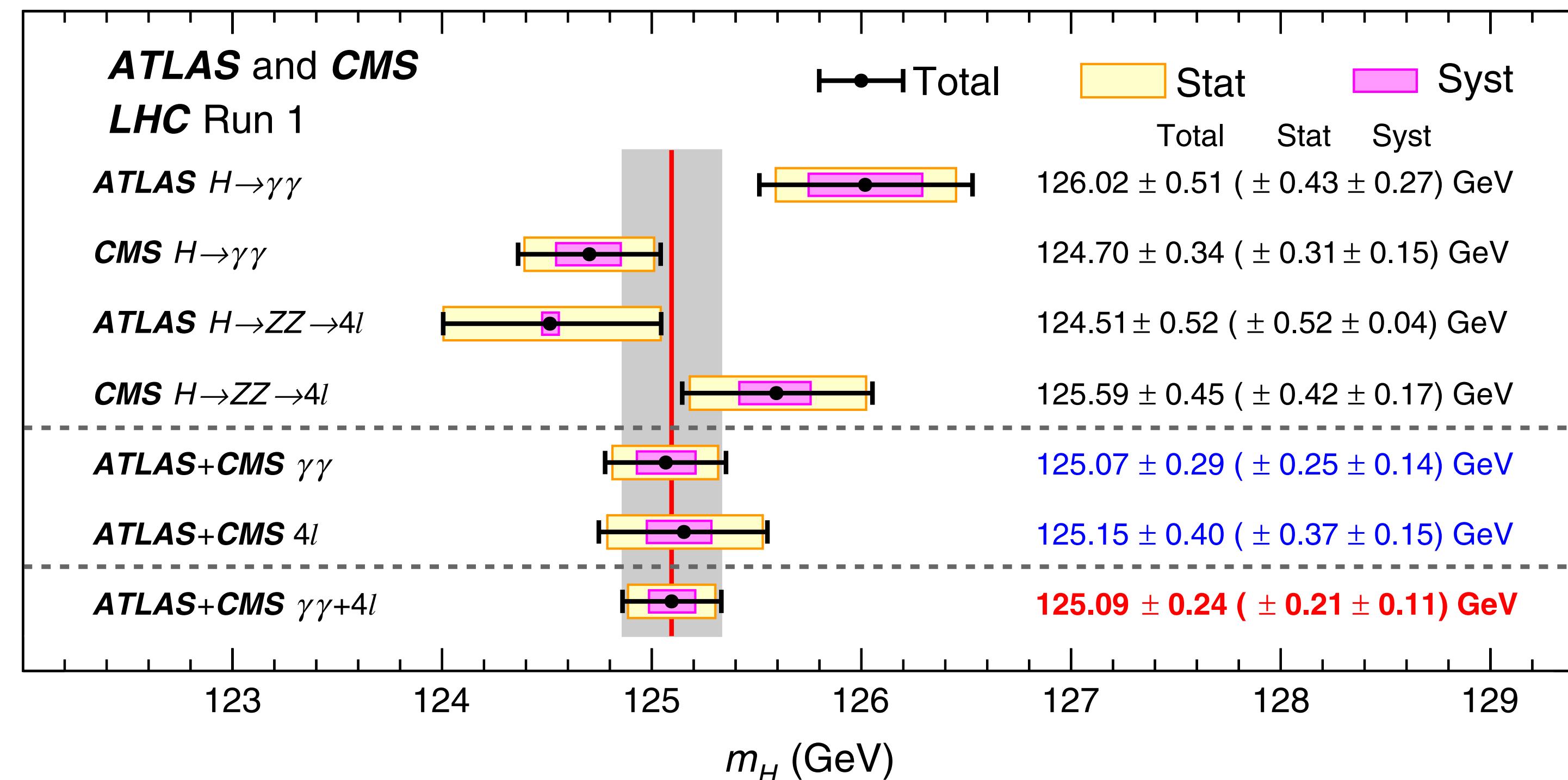


- **Photonen:** Fermion- und W-Boson-Schleife → **Interferenz**



Masse des Higgs-Bosons

- Genaue Bestimmung von m_H am LHC:
- **Vollständige Rekonstruktion** des Endzustands, geringer/gut verstandener Untergrund → Herausforderung: gute **Kalibration** von Impuls/Energie
- Besonders geeignet: $H \rightarrow \gamma\gamma$, $H \rightarrow ZZ^{(*)} \rightarrow 4\ell$ (Entdeckungskanäle)

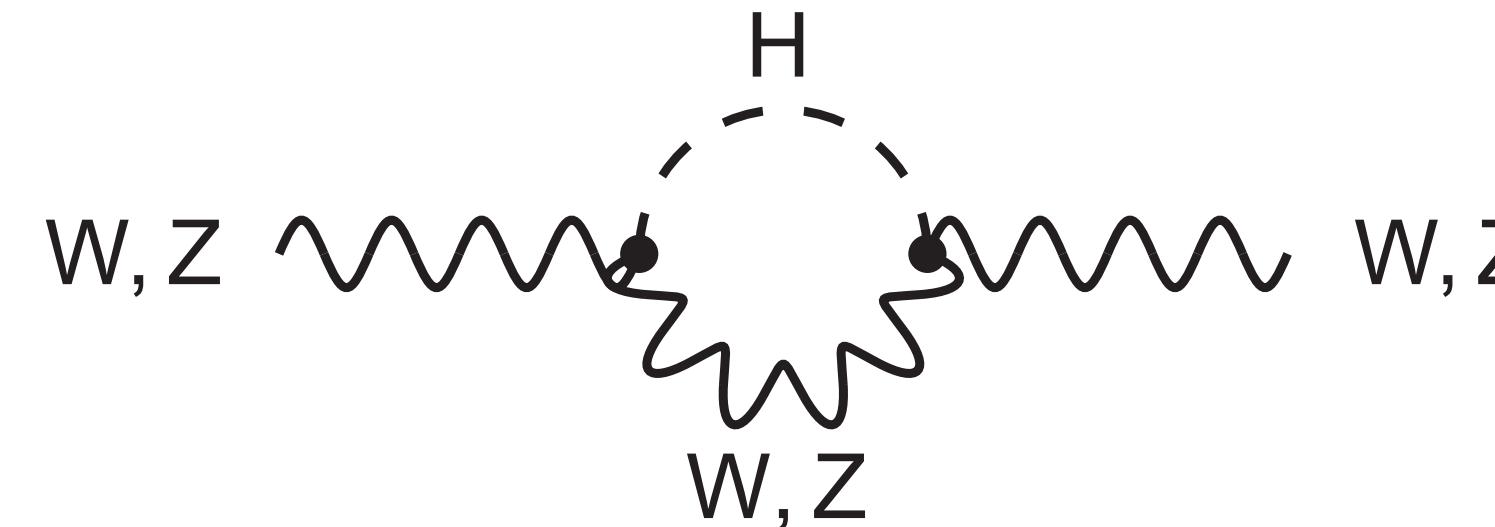


Relative Unsicherheit: $2 \cdot 10^{-3}$
 5154 Autor/inn/en!

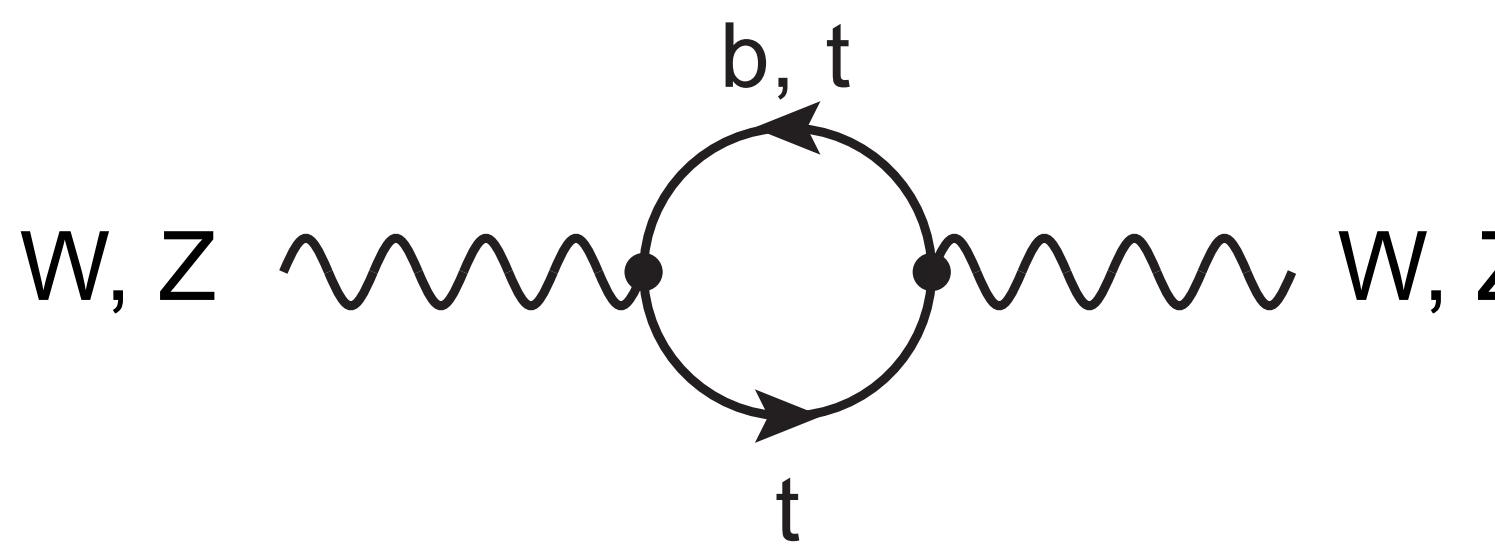
Update CMS 2020:
~~(PLB 805 (2020) 135425)~~:
 $m_H = 125,38(14)$ GeV

Massen von W, Top und Higgs

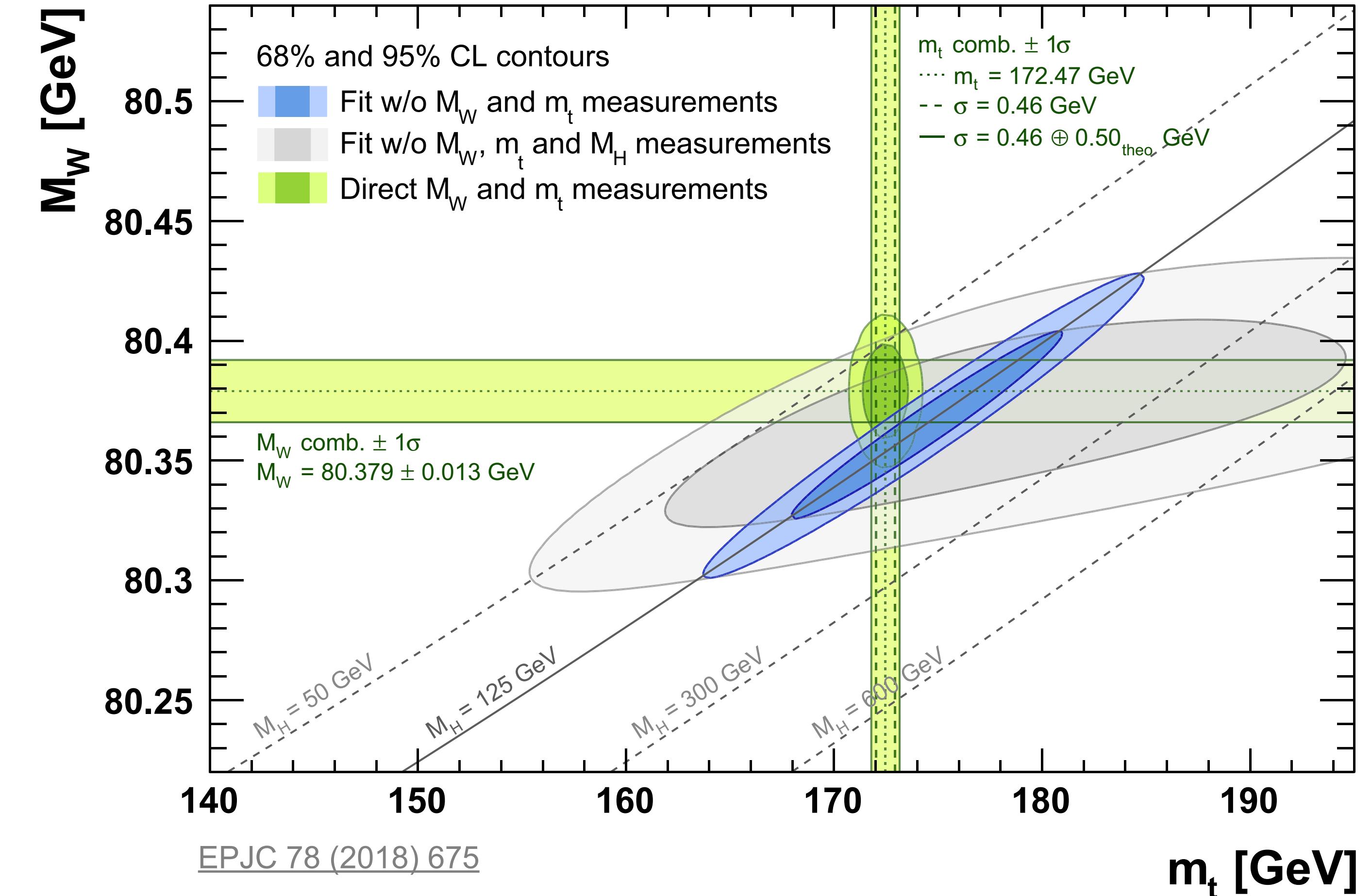
■ Erinnerung: Zusammenhang der Massen von W, Top und Higgs



$g' \ln(m_H / m_W)$
schwache Abhängigkeit (logarithmisch)

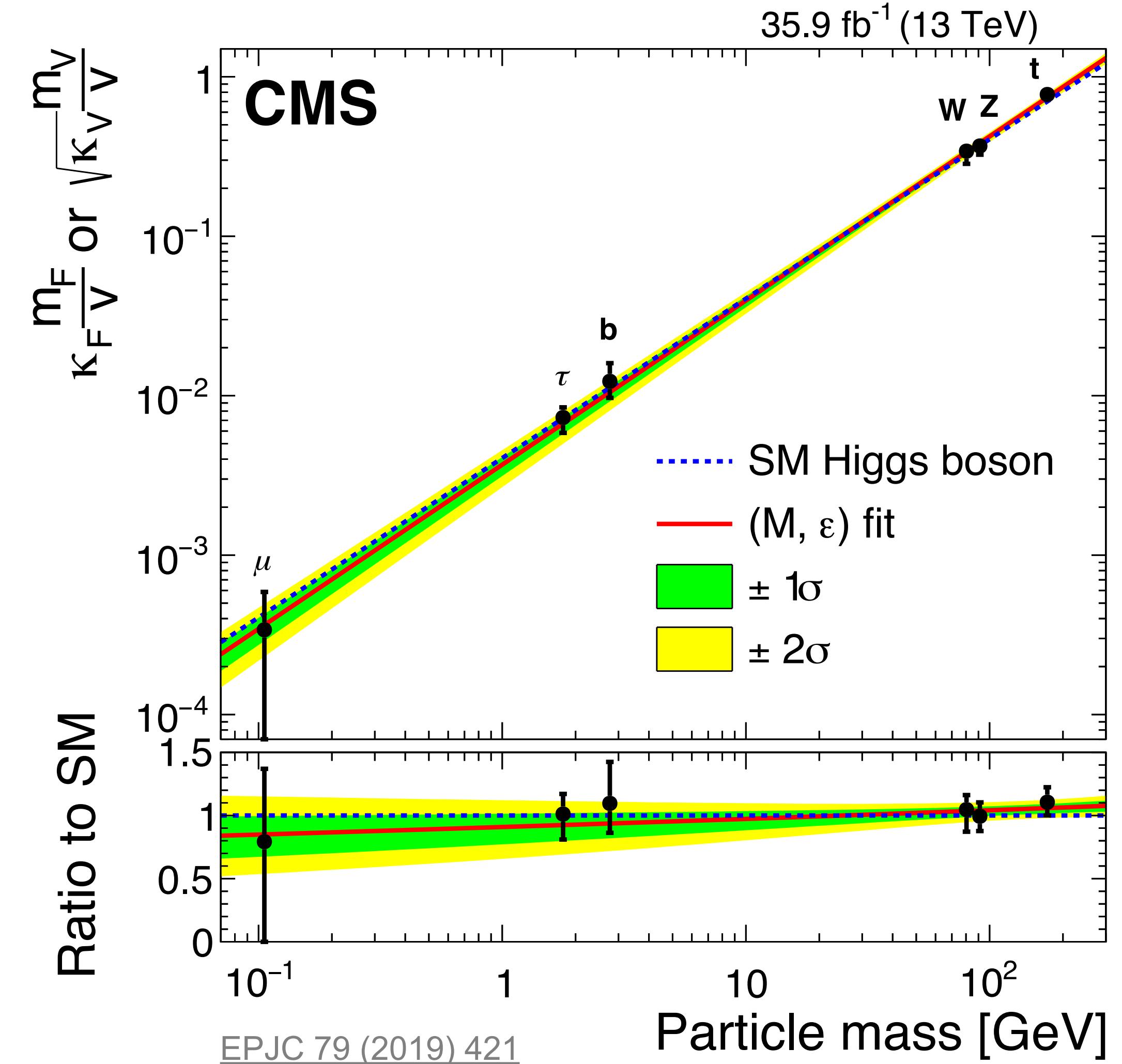


$\sim G_F m_t^2$
starke Abhängigkeit (quadratisch)



Kopplungen des Higgs-Bosons

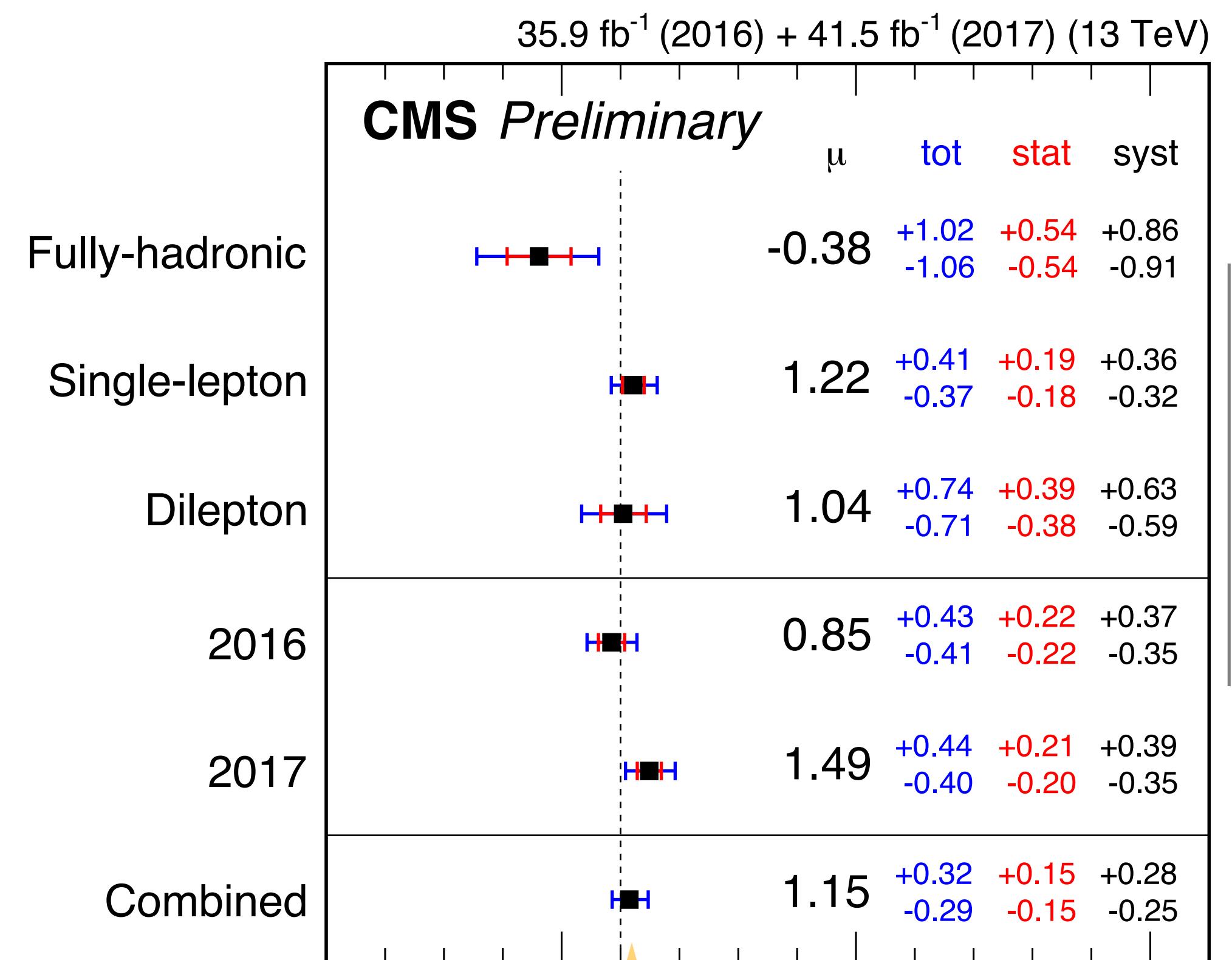
- Frage: Koppelt Higgs-Boson an die **Masse** von Elementarteilchen (SM: Fermionen $\sim m_f$, Bosonen $\sim m_V^2$)?
- Analyse aller Produktions- und Zerfallskanäle (und deren Korrelationen):
 - **Entdeckungschanäle** $H \rightarrow ZZ \rightarrow 4\ell$, $H \rightarrow \gamma\gamma$: sauber, hohe Massenauflösung
 - $H \rightarrow W^+W^- \rightarrow \ell\nu \ell\nu$: großer Wirkungsquerschnitt, schlechte Massenauflösung (zwei Neutrinos)
 - **Fermionische** Zerfälle $H \rightarrow b\bar{b}$, $H \rightarrow \tau^+\tau^-$: hoher Untergrund, mäßige Massenauflösung



Yukawa-Kopplung

- Fermionen: **Yukawa-Kopplung** ans Higgs-Boson
 - Indirekte Hinweise: Higgs-Produktion in Gluon-Gluon-Fusion und Zerfall in Photonen (**modellabhängig**: ggf. unbekannte weitere Teilchen in Schleife)
 - Erster **direkter** Nachweis: Evidenz für Zerfall $H \rightarrow \tau\tau$ ([Nature Phys. 10 \(2014\) 557](#))
 - **Modellunabhängige Messung** der Kopplungsstärke: assoziierte $t\bar{t}H$ -Produktion (und tHq/tHW)
 - erstmals 2018 beobachtet ([CMS](#), [ATLAS](#))

Assoziierte $t\bar{t}H$ -Produktion

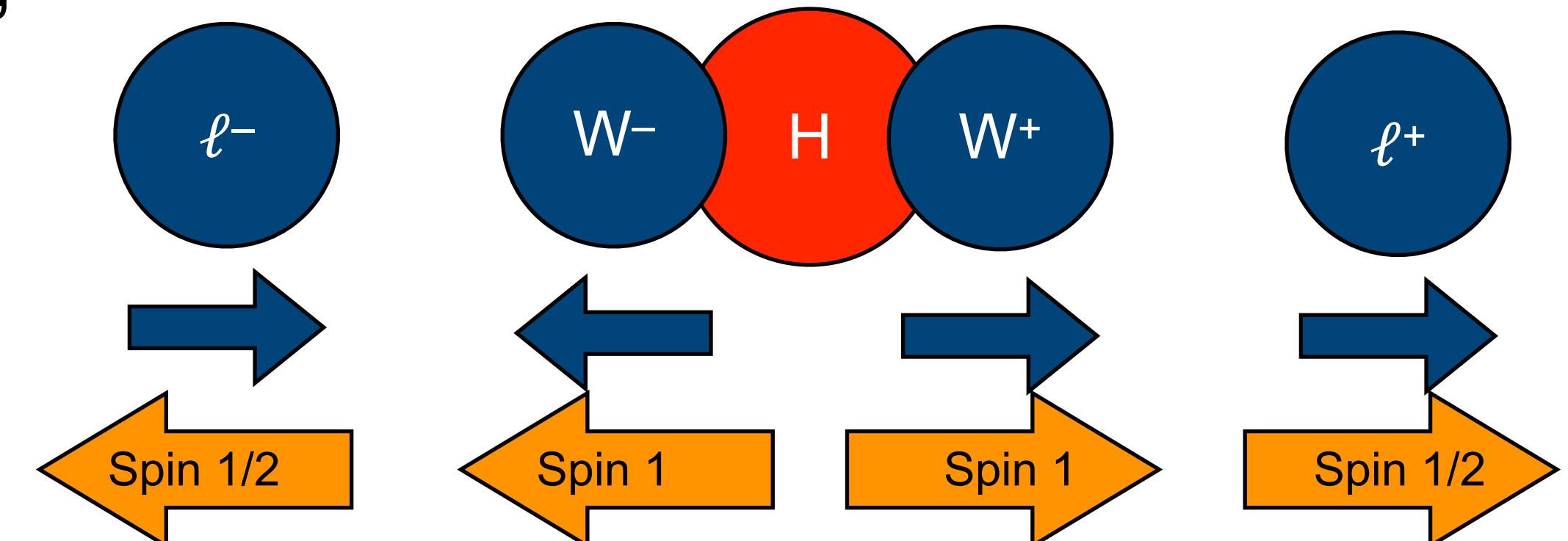


Wirkungsquerschnitt
 $\sim y_t^2$ verträglich mit
 SM-Erwartung

$$\hat{\mu} = \hat{\sigma}/\sigma_{\text{SM}}$$

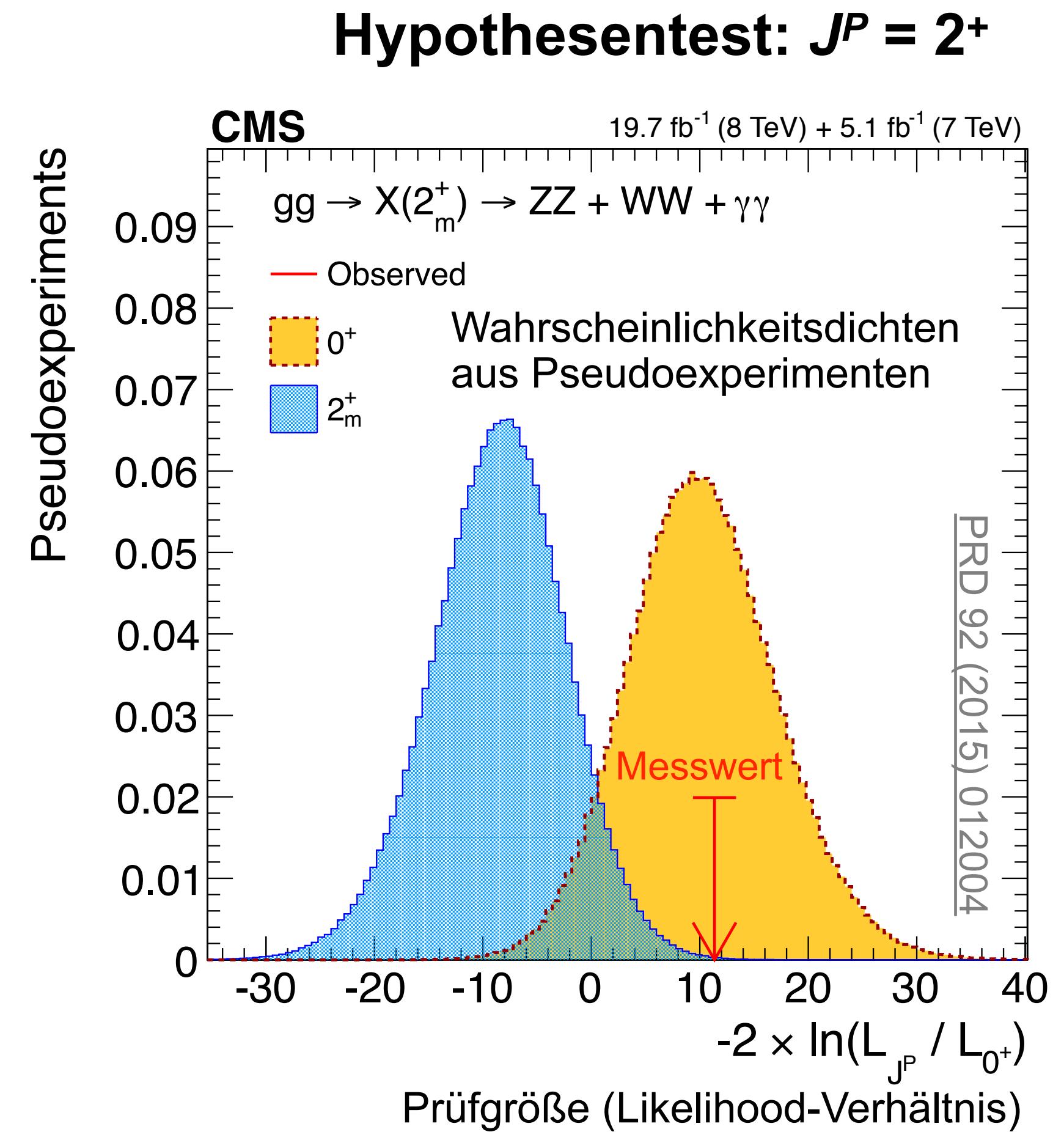
Quantenzahlen des Higgs-Bosons

- Analysestrategie: Quantenzahlen des Higgs-Bosons
 - Geeignete Zerfallskanäle: **bosonische** Zerfälle
 - Aufwändige Analyse der **Kopplungsstruktur**, hier nur einfache Argumente
 - **Hypothesentest**: alternative Hypothese gegen Standardmodell ($J^P = 0^+$)
- Einfaches Beispiel: Test auf Spin 0 in $H \rightarrow WW \rightarrow \ell\nu \ell\nu$
 - Spin 0: Zerfall in W^+ und W^- mit **derselben** Helizität (hier: **rechtshändig**)
 - $W \rightarrow \ell\nu$ ist V–A-Zerfall: linkshändiges ℓ^- , rechtshändiges $\ell^+ \rightarrow$ Leptonen in **dieselbe Richtung** emittiert
 - **Winkelverteilungen** der Leptonen:
→ **kleiner Öffnungswinkel** für Spin 0



Quantenzahlen des Higgs-Bosons

- Spin-1-Hypothese: bereits **ausgeschlossen**
- Landau-Yang-Theorem:
massives Spin-1-Teilchen kann nicht in zwei masselose Spin-1-Teilchen zerfallen
- Hauptproduktionskanal $gg \rightarrow H$ und Beobachtung von Zerfall $H \rightarrow \gamma\gamma$:
Widerspruch zu Landau-Yang-Theorem falls Higgs-Boson Spin 1 besitzt
- Spin-2-Hypothese:
 - Aufwändige **Winkelanalysen** (z. B. $H \rightarrow ZZ^{(*)}$)
 - Resultat: alle alternativen Hypothesen **ausgeschlossen** (>99% Konfidenzniveau)



Aufgabe 30

- Welche Aussagen zur Top-Quark- und Higgs-Boson-Physik am Hadron-Collider sind korrekt?
 - A. Top-Quarks können sowohl über die starke als auch über die elektroschwache Wechselwirkung produziert werden.
 - B. Das Higgs-Boson koppelt an die Masse, daher kann es nicht in Gluon-Gluon-Fusion produziert werden.
 - C. Das Higgs-Boson ist ein pseudoskalares Teilchen.
 - D. Zerfälle des Higgs-Bosons in zwei Gluonen sind aufgrund des hohen Untergrunds in der Praxis ungeeignet.
 - E. Die Massen des Top-Quarks, des W-Bosons und des Higgs-Bosons sind über Quantenkorrekturen verknüpft.
- Bitte beantworten Sie diese Frage anonym auf ILIAS:
https://ilias.studium.kit.edu/goto.php?target=fold_1080516&client_id=produktiv

Zusammenfassung: Higgs-Physik

- Higgs-Boson-Physik am LHC heute: genaue Vermessung der **Eigenschaften** des Higgs-Bosons
 - Etablierung aller **Produktions- und Zerfallskanäle**
 - Genaue Bestimmung der **Higgs-Boson-Masse**
→ Konsistenz der Massen von W-Boson, Top-Quark und Higgs-Boson?
 - Messung der **Kopplungsstärken** an Eichbosonen und Fermionen
 - Hypothesentest: **Quantenzahlen** des Higgs-Bosons $JP = 0^+$?