

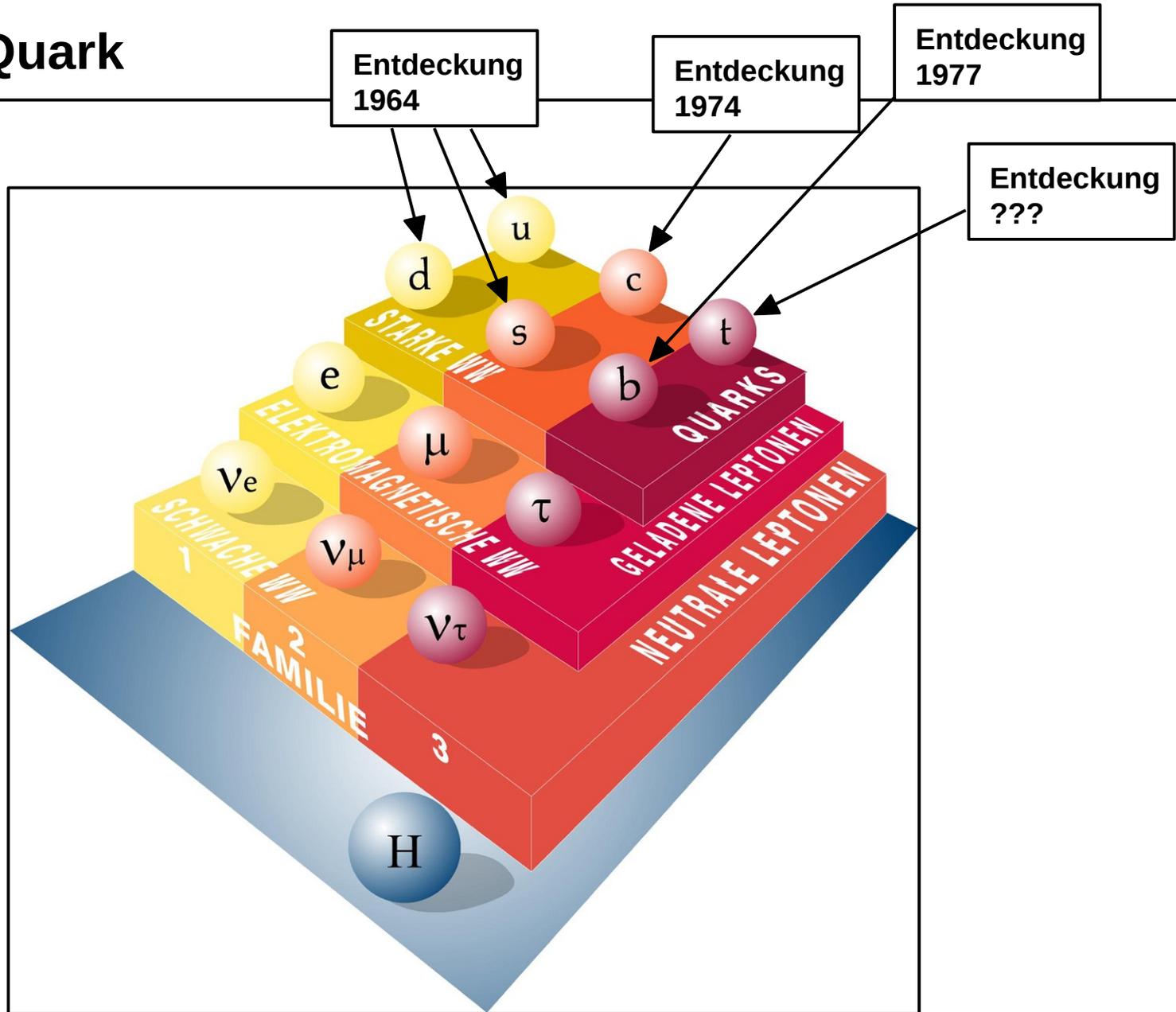
Moderne Experimentalphysik III: Hadronen und Teilchen (Physik VI)

Thomas Müller, Roger Wolf
26. Juni 2018

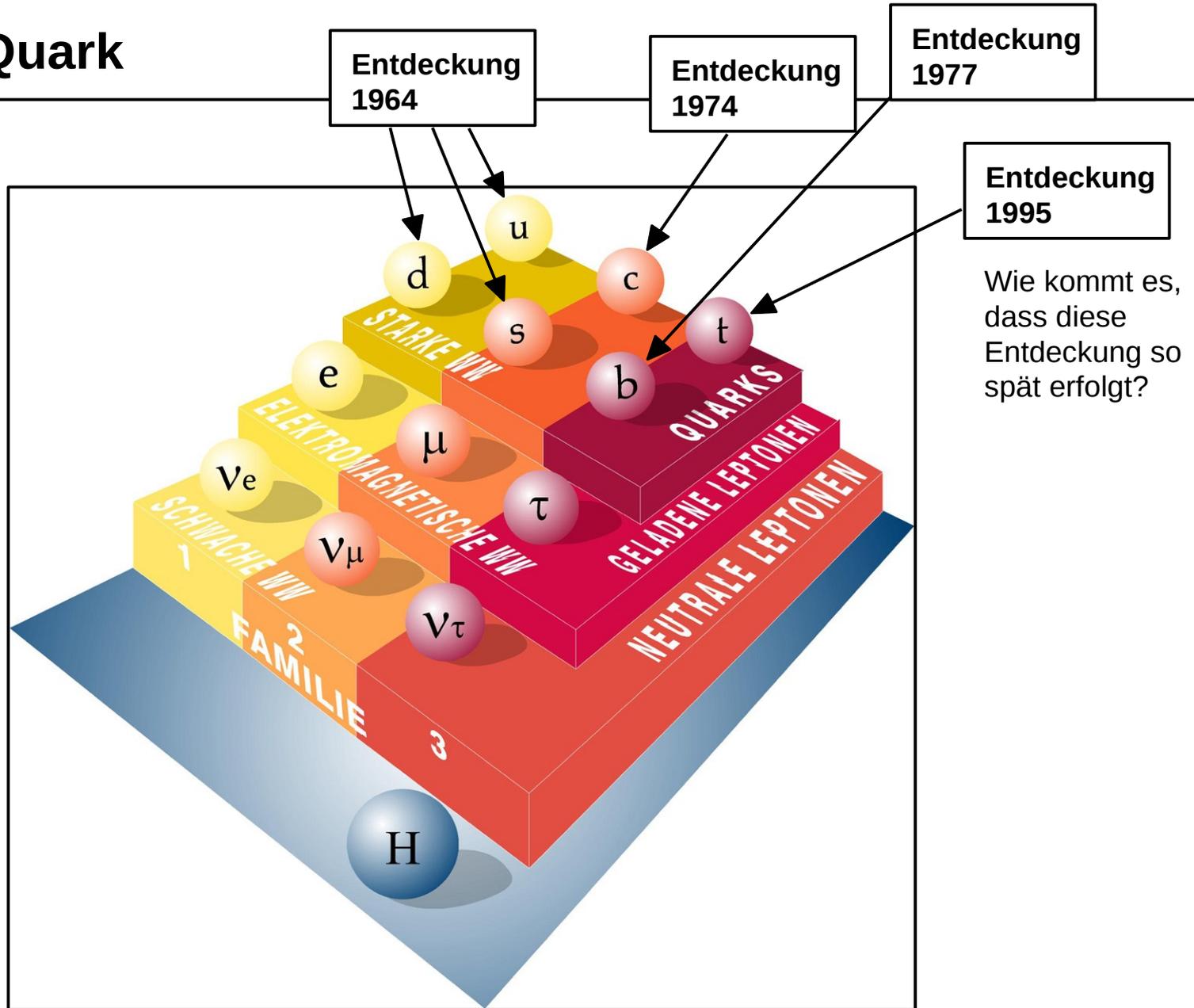
INSTITUTE OF EXPERIMENTAL PARTICLE PHYSICS (IETP) – PHYSICS FACULTY



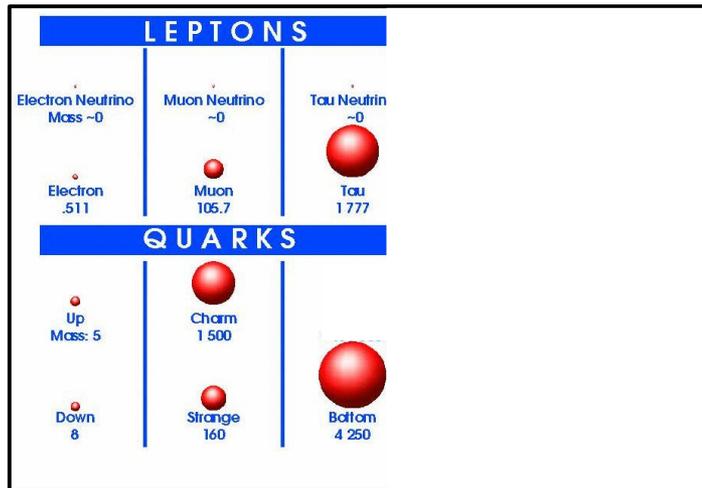
Das Top Quark



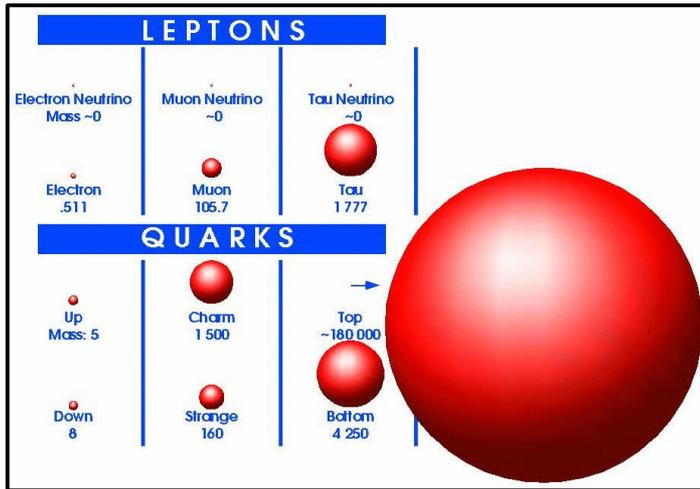
Das Top Quark



Das Top Quark im SM

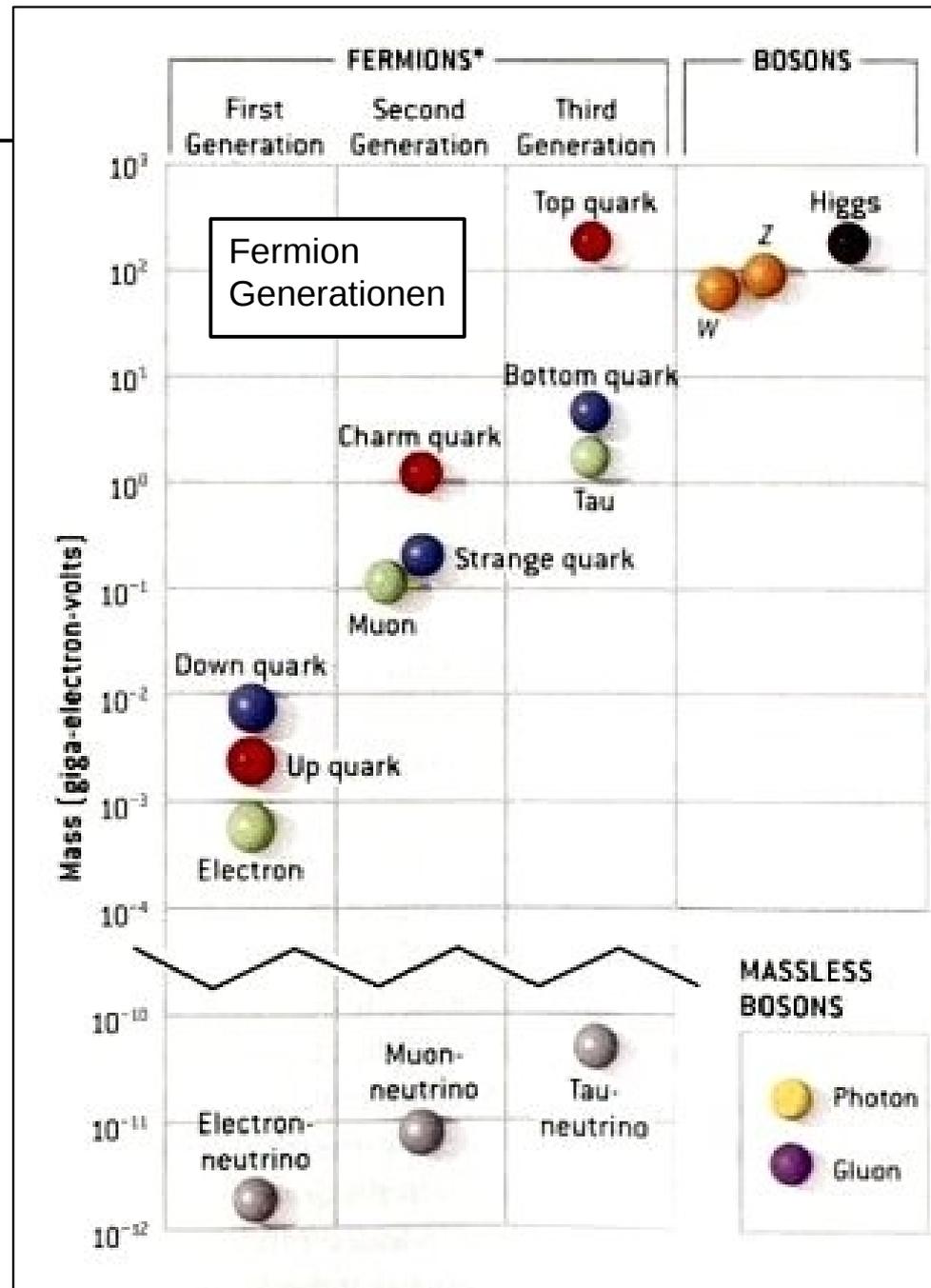


Das Top Quark im SM

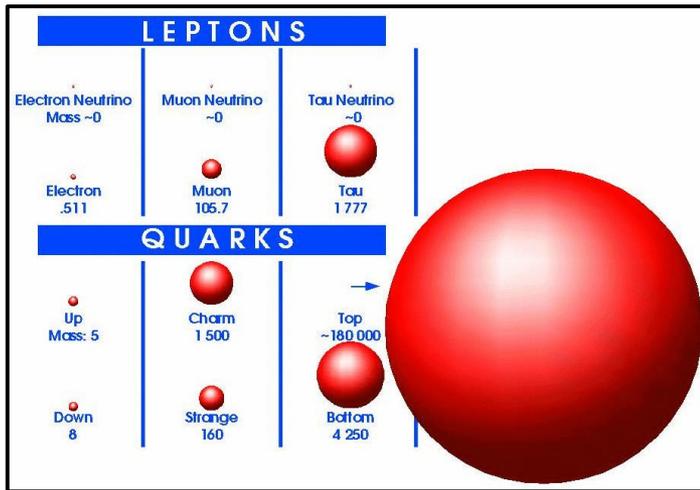


- Mit Abstand größte Masse:

$$m_t = 175 \text{ GeV}$$



Das Top Quark im SM

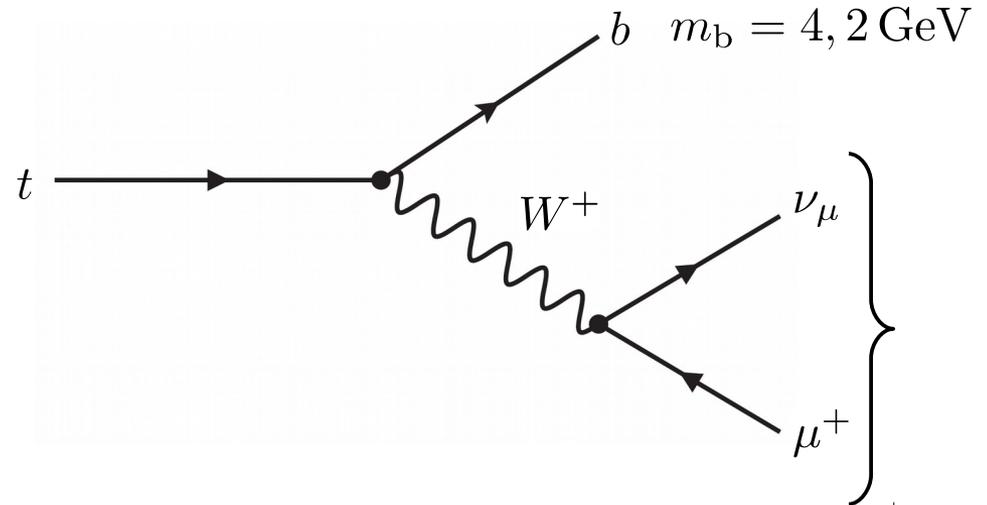


- Mit Abstand größte Masse:

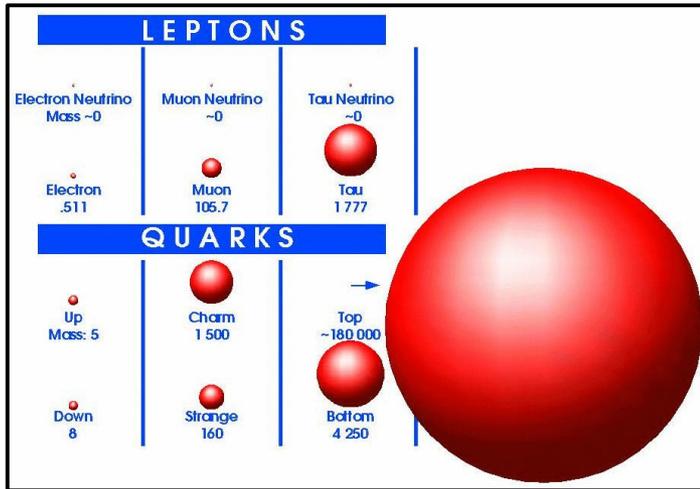
$$m_t = 175 \text{ GeV}$$

- Kürzeste Lebensdauer:

$$t_{1/2} = 5 \times 10^{-25} \text{ s}$$



Das Top Quark im SM

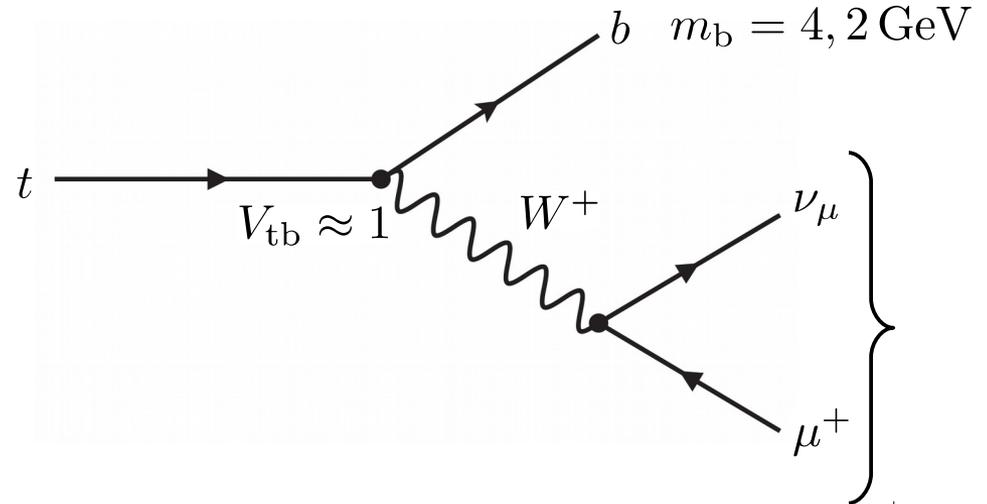


- Mit Abstand größte Masse:

$$m_t = 175 \text{ GeV}$$

- Kürzeste Lebensdauer:

$$t_{1/2} = 5 \times 10^{-25} \text{ s}$$



Fermis Goldene Regel:

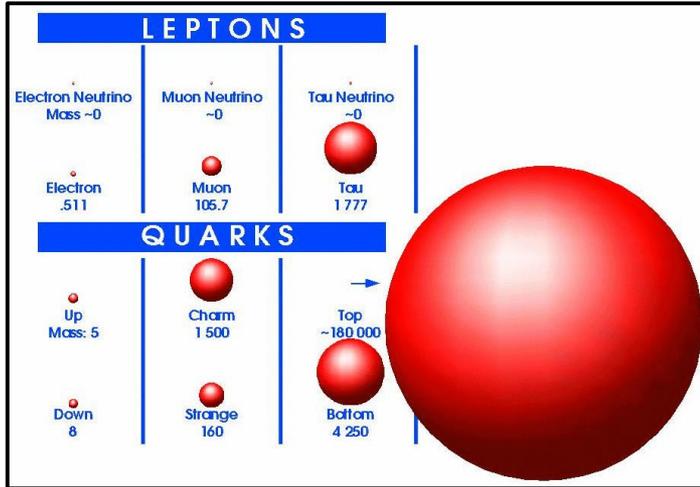
$$m_W = 80 \text{ GeV}$$

$$W = \frac{2\pi}{\hbar} |\mathcal{S}_{fi}|^2 \rho_f$$

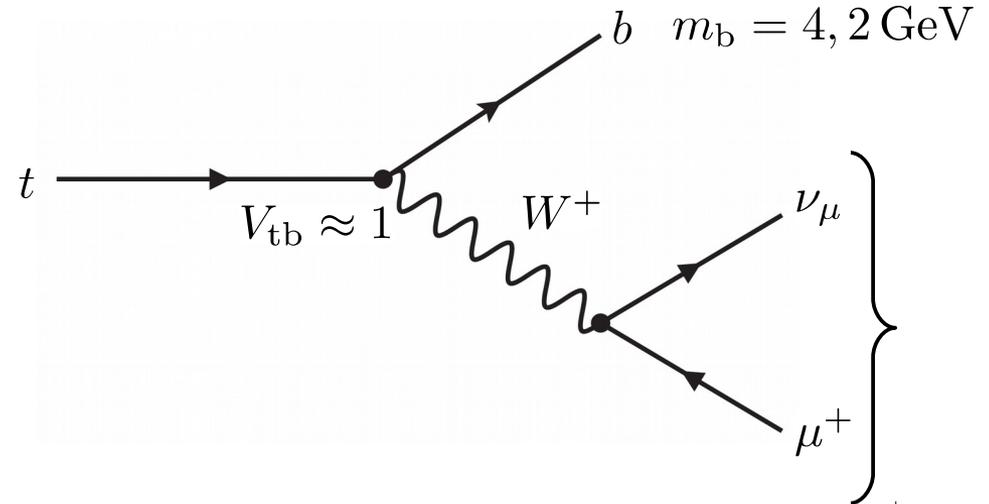
$$\rho_f = \frac{d}{dE_f} \int_V \frac{d^3\vec{p}_f d^3\vec{x}_f}{(2\pi\hbar)^3}$$

Phasenraumintegral führt auf E_f^5
Abhängigkeit von der frei werdenden
Energie im Endzustand (Sargent-Regel).

Das Top Quark im SM



- Mit Abstand größte Masse:
 $m_t = 175 \text{ GeV}$
- Kürzeste Lebensdauer:
 $t_{1/2} = 5 \times 10^{-25} \text{ s}$
- Zerfällt schneller, als es Hadronen ausbilden kann ($t_{\text{had}} = \times 10^{-23} \text{ s}$)!



$$m_W = 80 \text{ GeV}$$

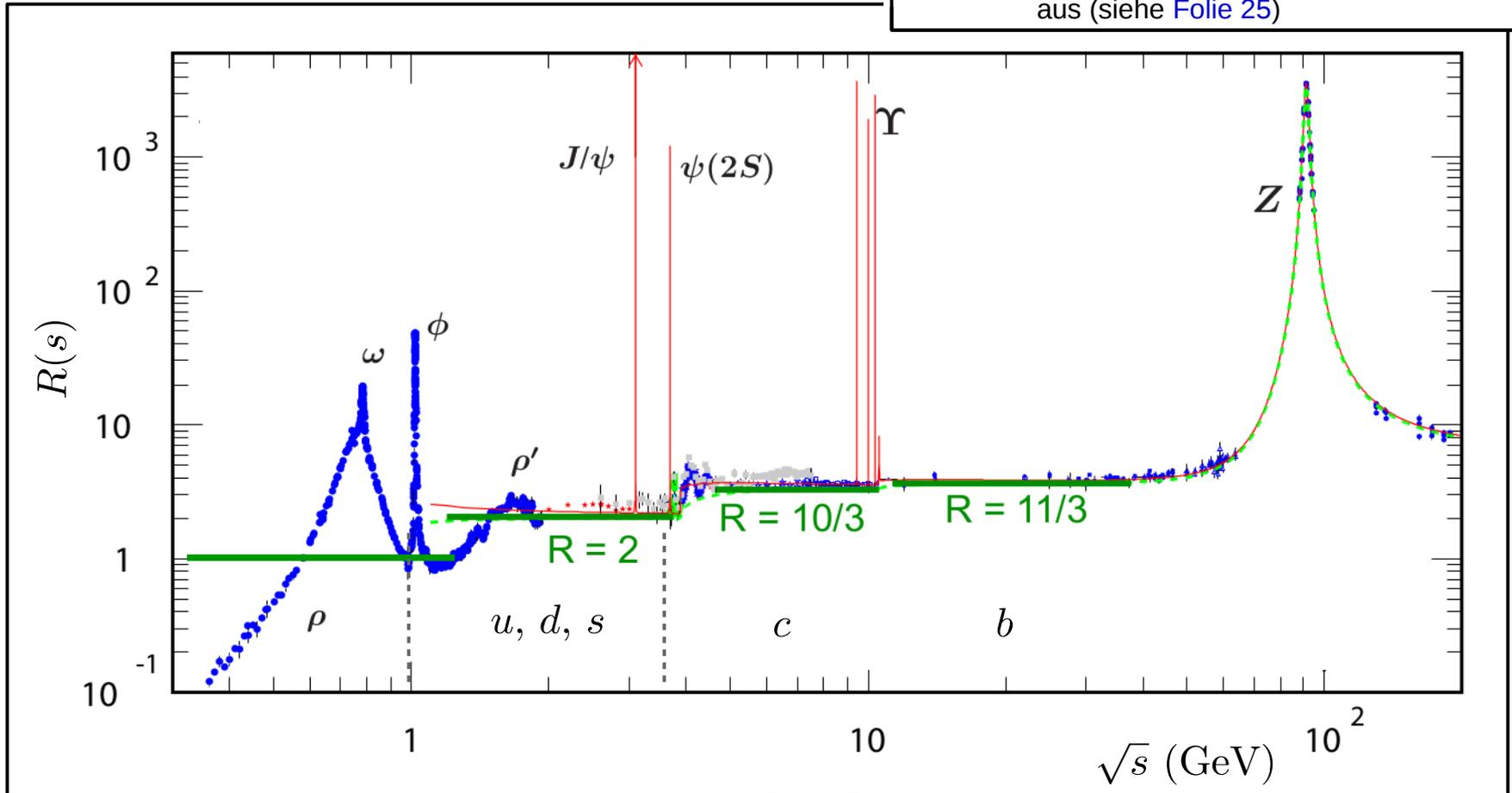
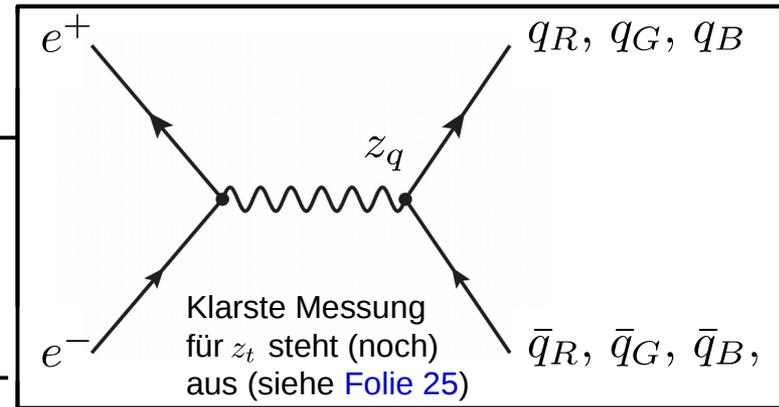
Im SM gibt es keine freien Quarks. Die kurze Lebensdauer des Top erlaubt es aber ein **quasifreies Quark** zu studieren.

Konkrete Konsequenzen im weiteren Verlauf dieser Vorlesung (Folien [18](#), [22](#), [24](#), [25](#), [28](#))

Erzeugung von Top Quarks

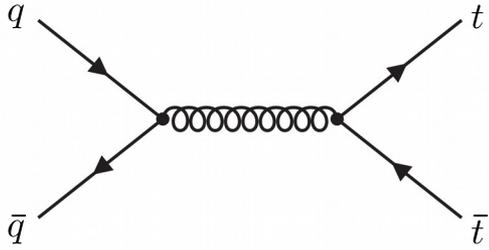
- Noch nie an einem Lepton-Collider beobachtet:

$$R(s) = \frac{\sigma(e^+e^- \rightarrow q\bar{q})}{\sigma(e^+e^- \rightarrow \mu^+\mu^-)} = N_c \sum z_q^2$$

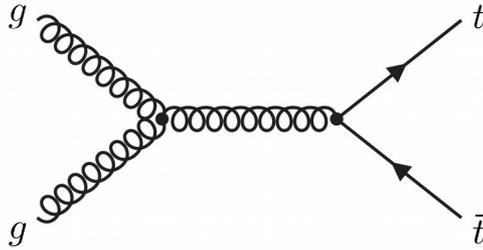


Erzeugung von Top Quarks

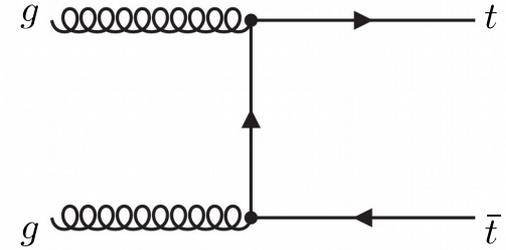
- An Hadron-Collidern (v.a. durch starke WW in Form von $t\bar{t}$ -Paaren):



$q\bar{q}$ -Annihilation

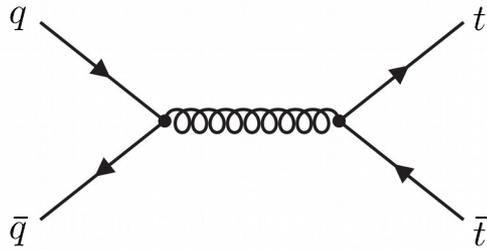


gg -Fusion

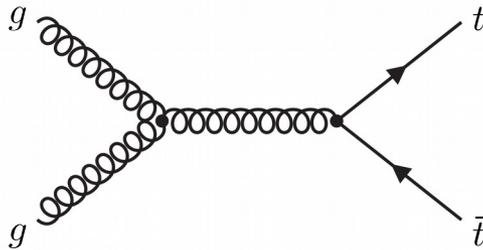


Erzeugung von Top Quarks

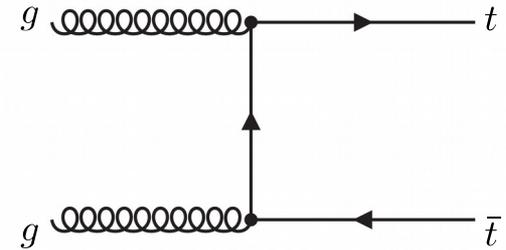
- An Hadron-Collidern (v.a. durch starke WW in Form von $t\bar{t}$ -Paaren):



$q\bar{q}$ -Annihilation 90%



gg -Fusion 10%



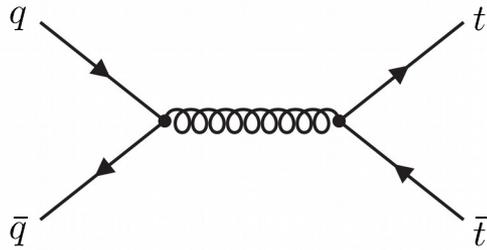
- Tevatron $p\bar{p}$ -Beschleuniger (1995):

$\sqrt{s} = 1,96 \text{ TeV}$

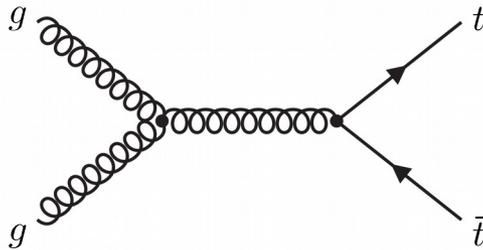


Erzeugung von Top Quarks

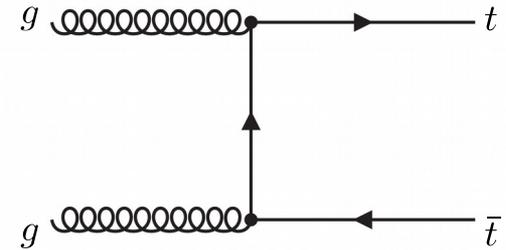
- An Hadron-Collidern (v.a. durch starke WW in Form von $t\bar{t}$ -Paaren):



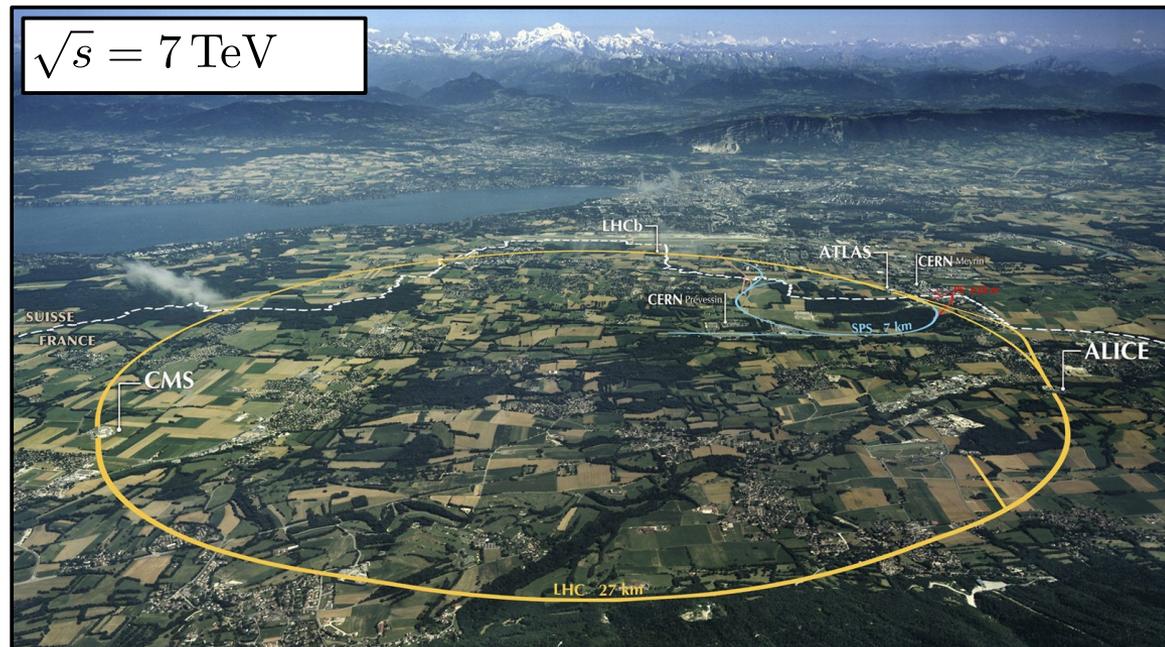
$q\bar{q}$ -Annihilation 10%



gg -Fusion 90%

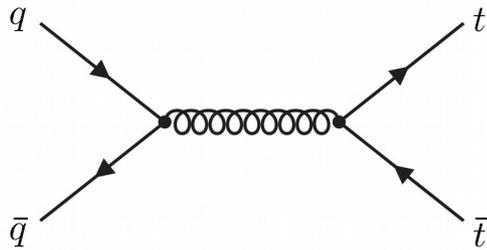


- LHC pp-Beschleuniger (2010):

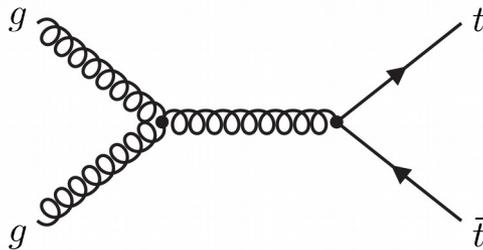


Erzeugung von Top Quarks

- An Hadron-Collidern (v.a. durch starke WW in Form von $t\bar{t}$ -Paaren):



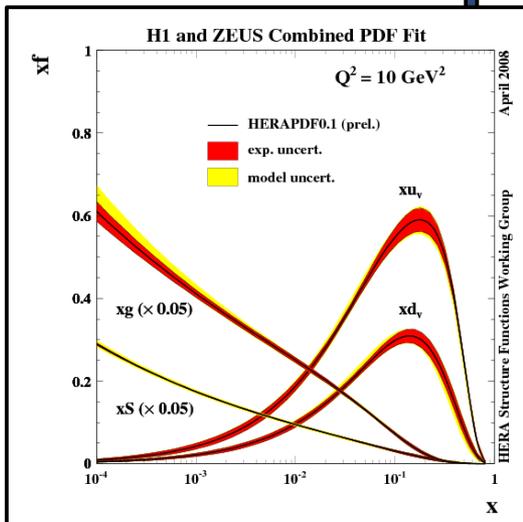
$q\bar{q}$ -Annihilation 10%



gg -Fusion 90%

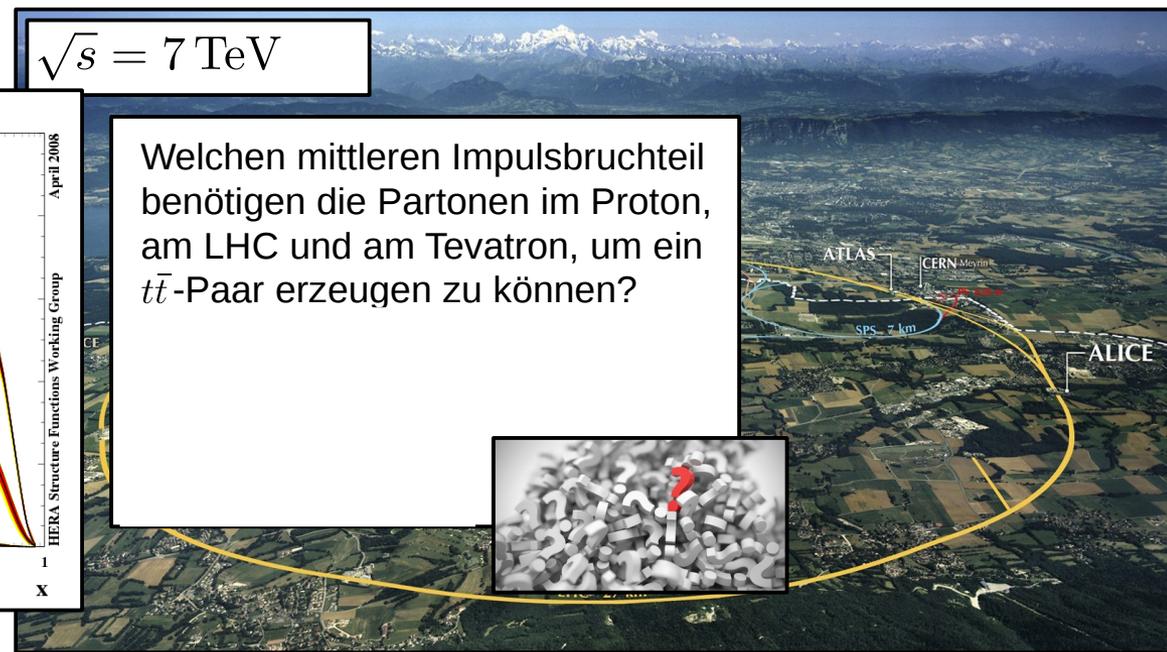
- LHC pp -Beschleuniger (2010):

$$\sqrt{s} = 7 \text{ TeV}$$



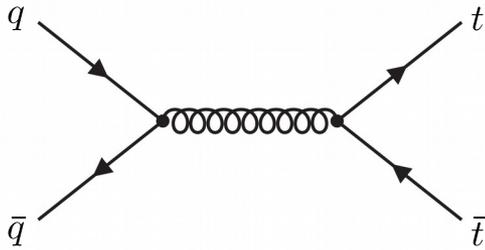
Vergleiche VL-03

Welchen mittleren Impulsbruchteil benötigen die Partonen im Proton, am LHC und am Tevatron, um ein $t\bar{t}$ -Paar erzeugen zu können?

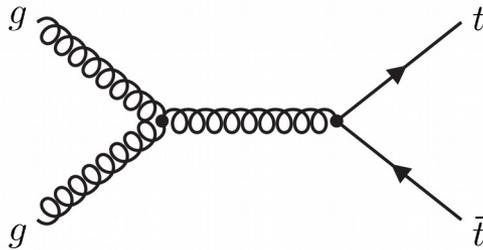


Erzeugung von Top Quarks

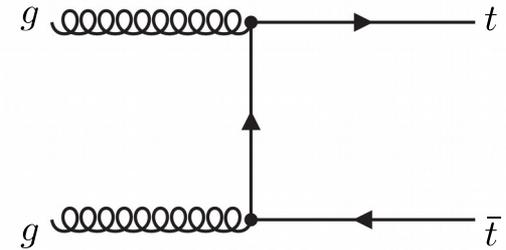
- An Hadron-Collidern (v.a. durch starke WW in Form von $t\bar{t}$ -Paaren):



$q\bar{q}$ -Annihilation 10%

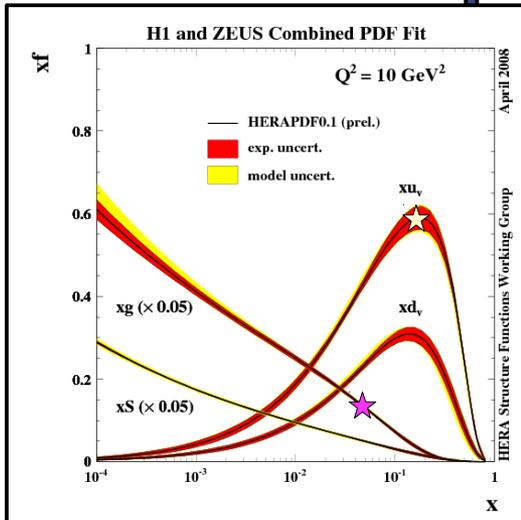


gg -Fusion 90%



- LHC pp -Beschleuniger (2010):

$$\sqrt{s} = 7 \text{ TeV}$$



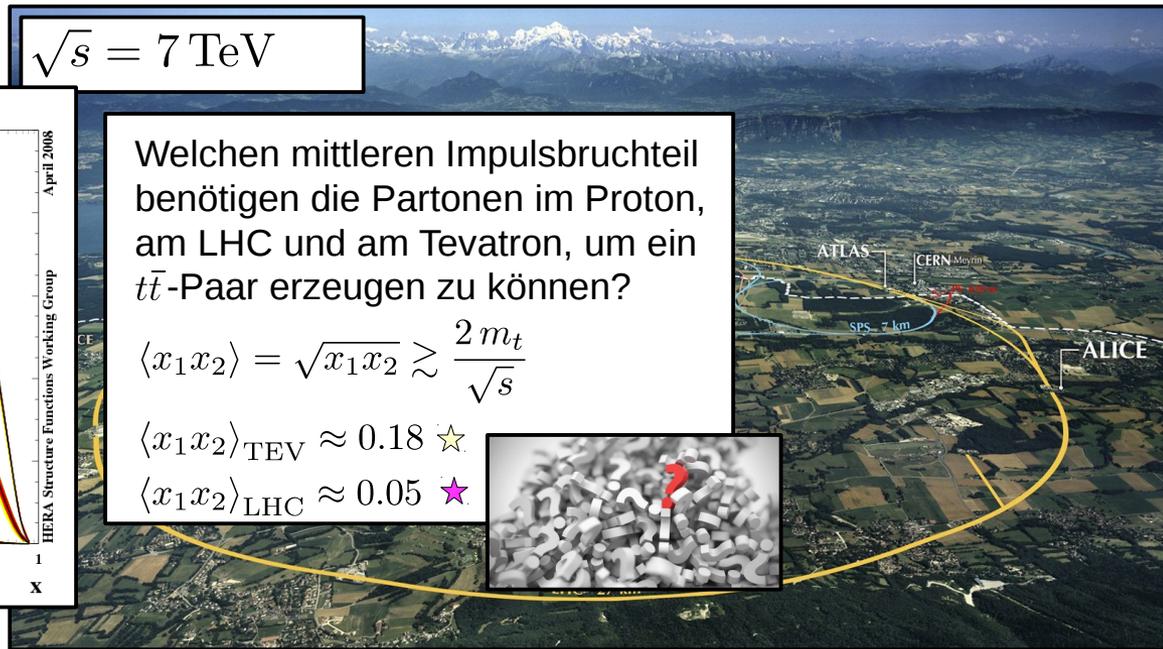
Vergleiche VL-03

Welchen mittleren Impulsbruchteil benötigen die Partonen im Proton, am LHC und am Tevatron, um ein $t\bar{t}$ -Paar erzeugen zu können?

$$\langle x_1 x_2 \rangle = \sqrt{x_1 x_2} \gtrsim \frac{2 m_t}{\sqrt{s}}$$

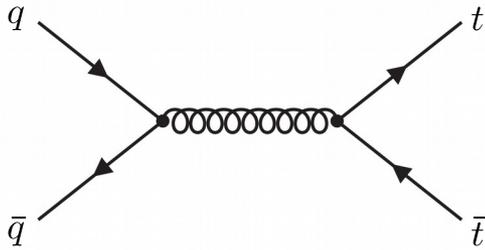
$$\langle x_1 x_2 \rangle_{\text{TEV}} \approx 0.18 \star$$

$$\langle x_1 x_2 \rangle_{\text{LHC}} \approx 0.05 \star$$

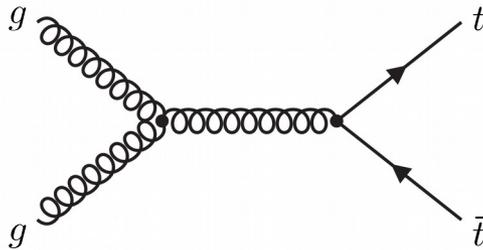


Erzeugung von Top Quarks

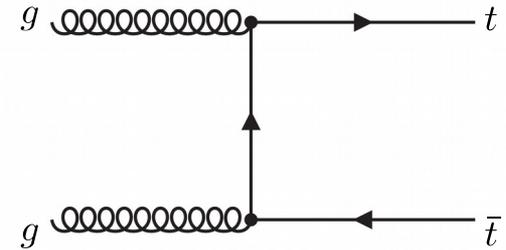
- An Hadron-Collidern (v.a. durch starke WW in Form von $t\bar{t}$ -Paaren):



$q\bar{q}$ -Annihilation 10%

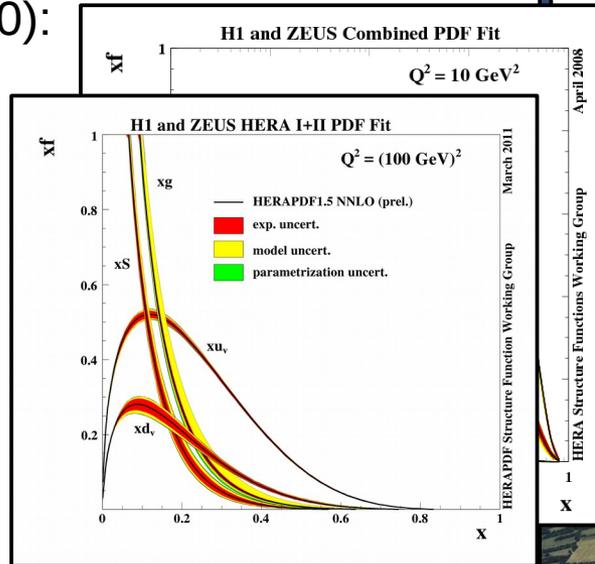


gg -Fusion 90%



- LHC pp -Beschleuniger (2010):

$$\sqrt{s} = 7 \text{ TeV}$$

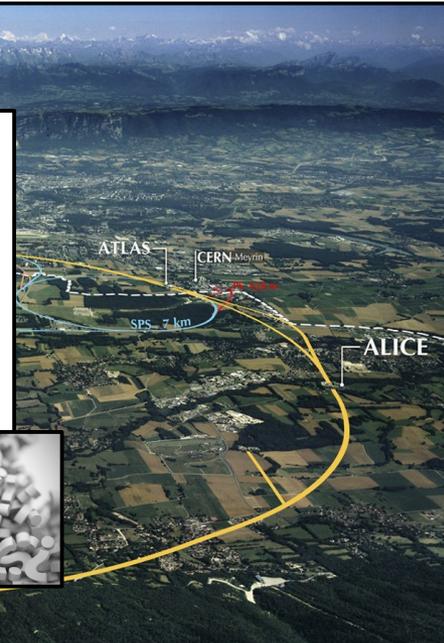


Welchen mittleren Impulsbruchteil benötigen die Partonen im Proton, am LHC und am Tevatron, um ein $t\bar{t}$ -Paar erzeugen zu können?

$$\langle x_1 x_2 \rangle = \sqrt{x_1 x_2} \gtrsim \frac{2 m_t}{\sqrt{s}}$$

$$\langle x_1 x_2 \rangle_{\text{TEV}} \approx 0.18 \star$$

$$\langle x_1 x_2 \rangle_{\text{LHC}} \approx 0.05 \star$$

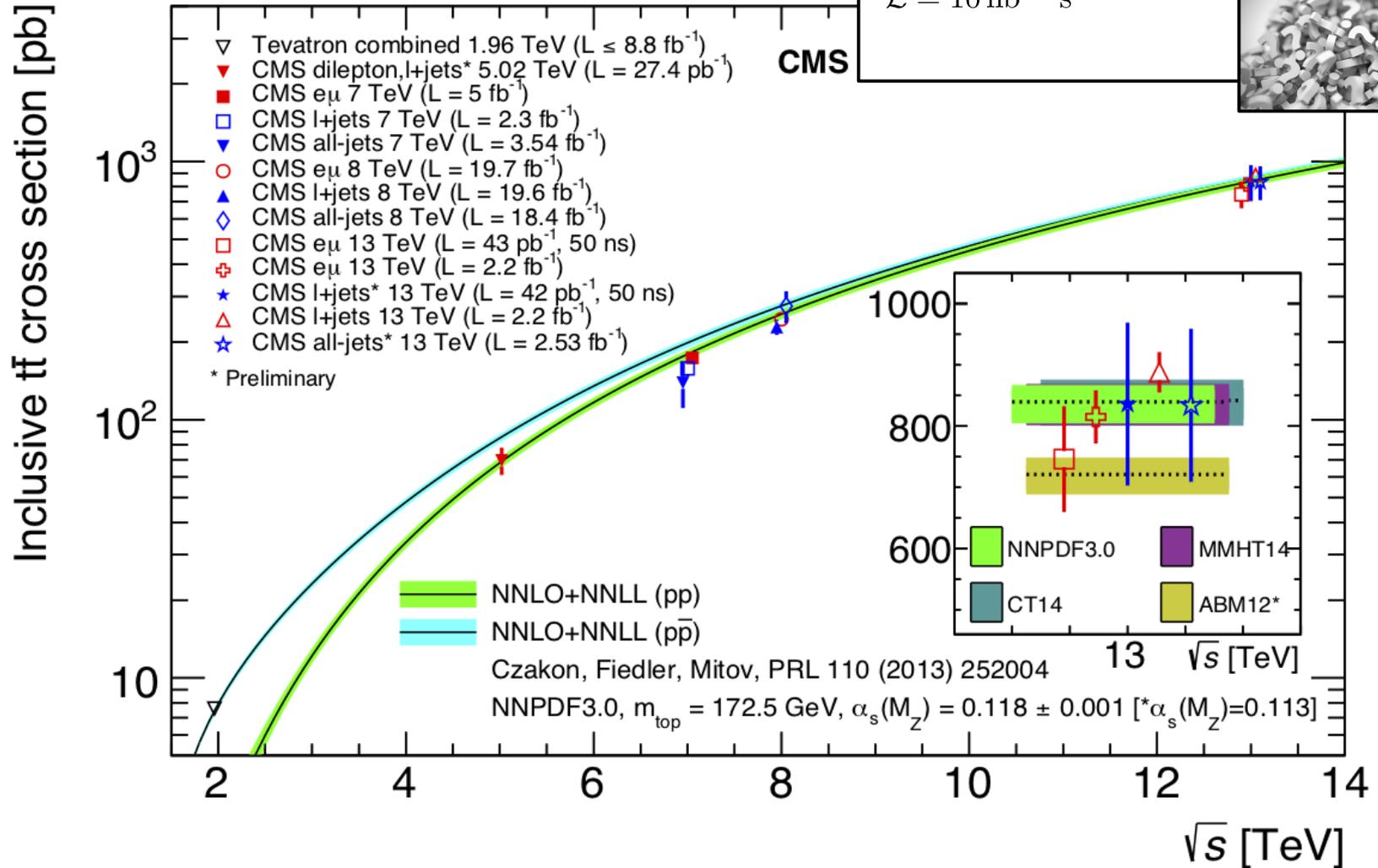


Erzeugung von Top Quarks

Man bezeichnet den LHC als Top-Fabrik. Berechnen Sie die Produktionsrate von $t\bar{t}$ -Paaren am LHC:

$$\sigma_{t\bar{t}}^{13\text{ TeV}} = 746 \pm 86 \text{ pb}$$

$$\mathcal{L} = 10 \text{ nb}^{-1} \text{ s}^{-1}$$



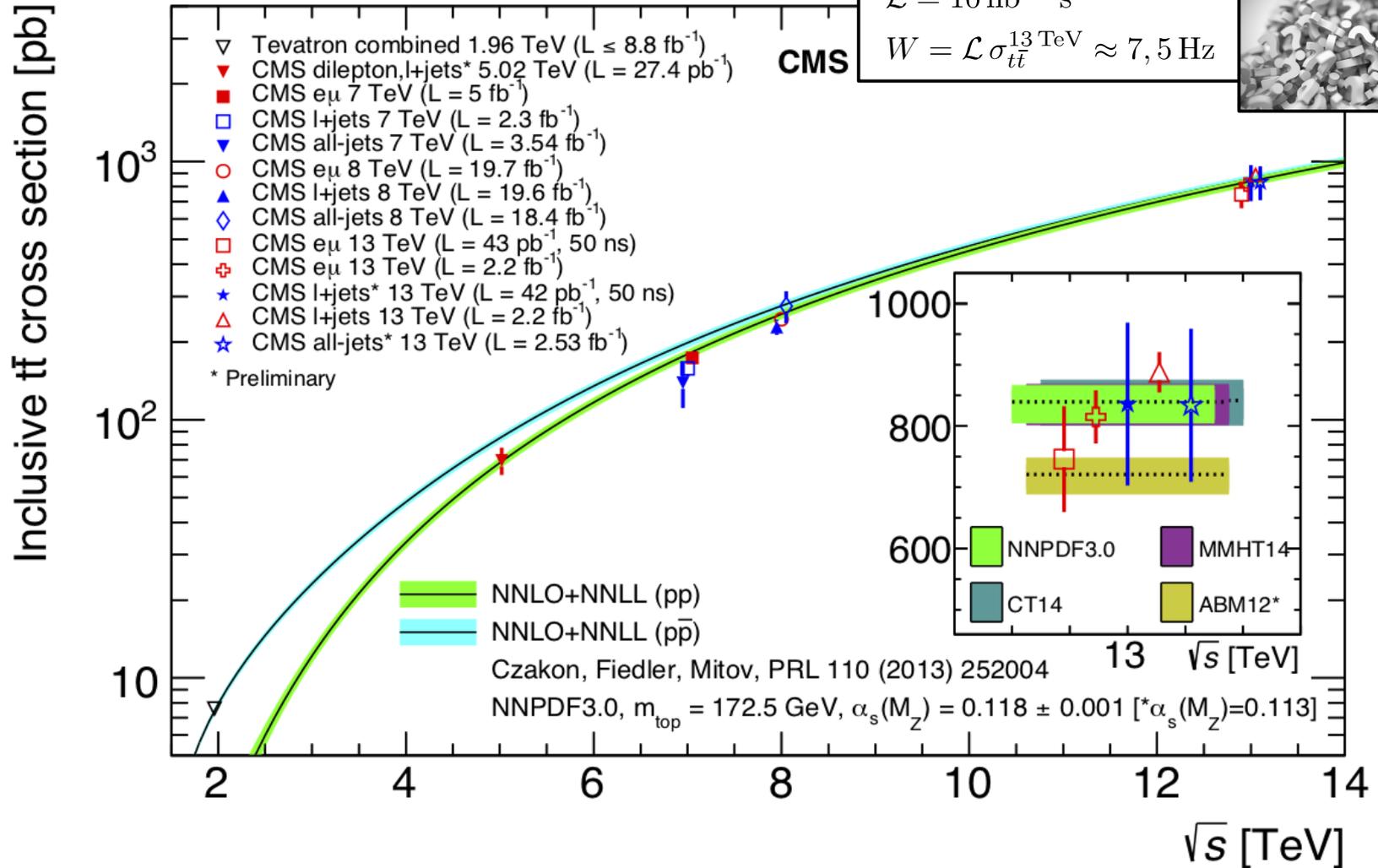
Erzeugung von Top Quarks

Man bezeichnet den LHC als Top-Fabrik. Berechnen Sie die Produktionsrate von $t\bar{t}$ -Paaren am LHC:

$$\sigma_{t\bar{t}}^{13\text{ TeV}} = 746 \pm 86 \text{ pb}$$

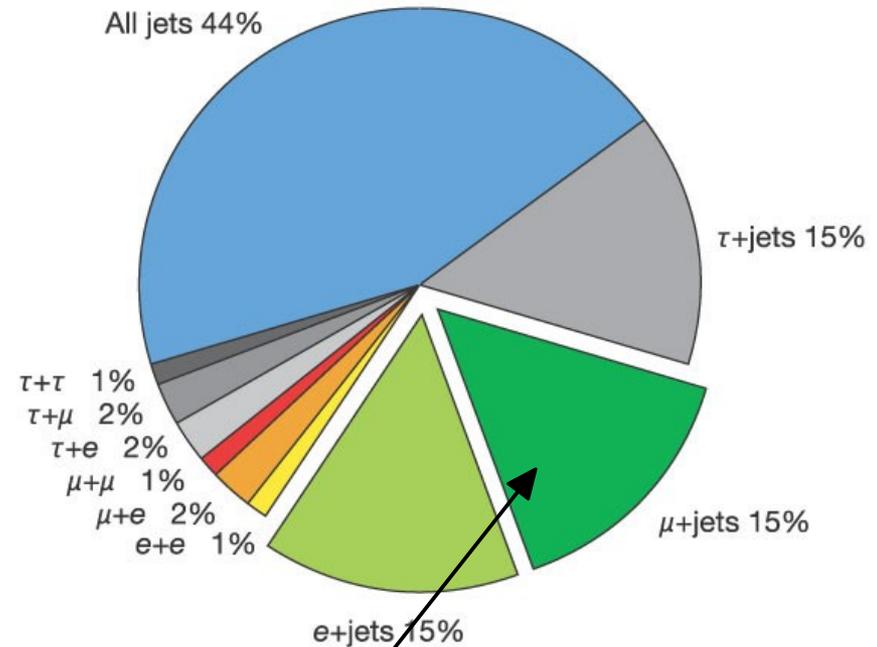
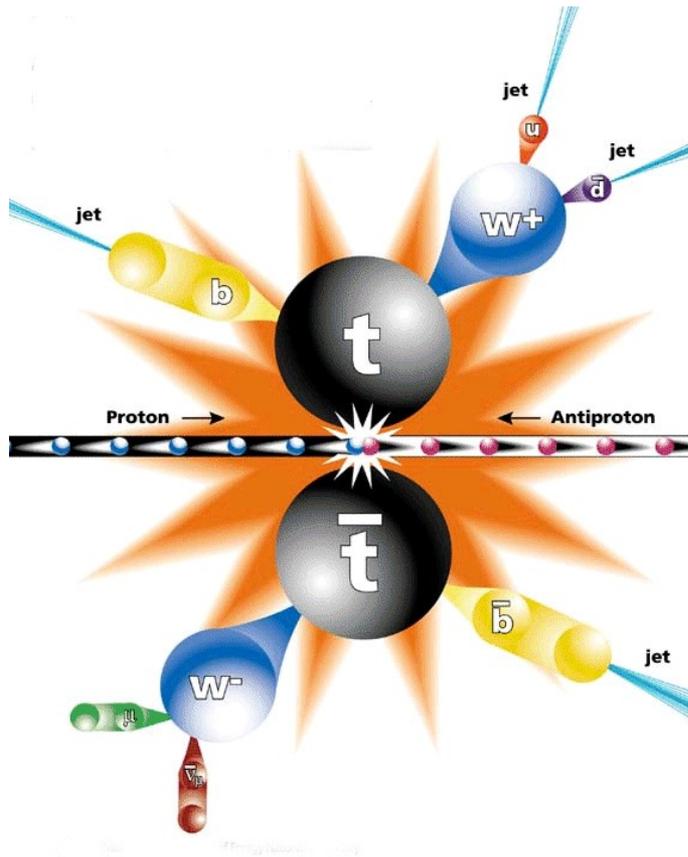
$$\mathcal{L} = 10 \text{ nb}^{-1} \text{ s}^{-1}$$

$$W = \mathcal{L} \sigma_{t\bar{t}}^{13\text{ TeV}} \approx 7,5 \text{ Hz}$$



Zerfall von Top Quark Paaren

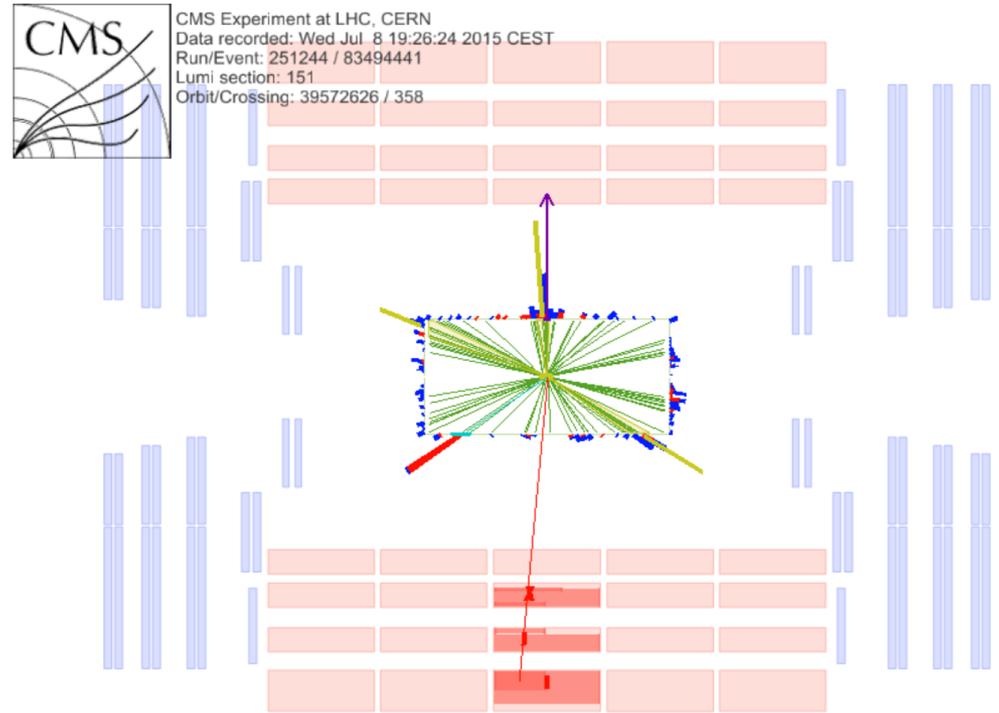
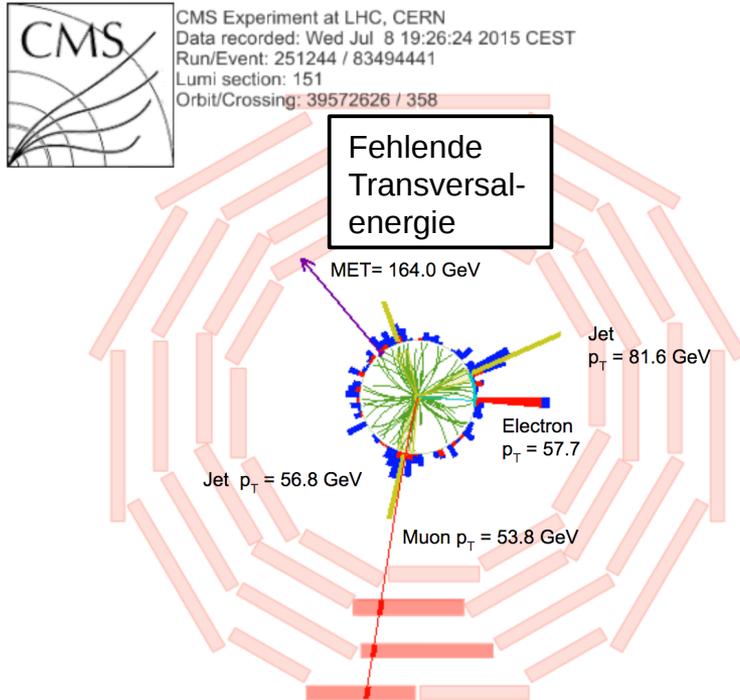
- Zerfall über schwache WW (siehe Folie 3)



- Klassifikation nach Zerfall der W-Bosonen (z.B. $\mu + 2 \text{ q jets} + 2 \text{ b jets}$)
- Elektronen und Myonen einfach im Detektor nachweisbar (siehe VL-05, 06, 07)

Signatur im Detektor

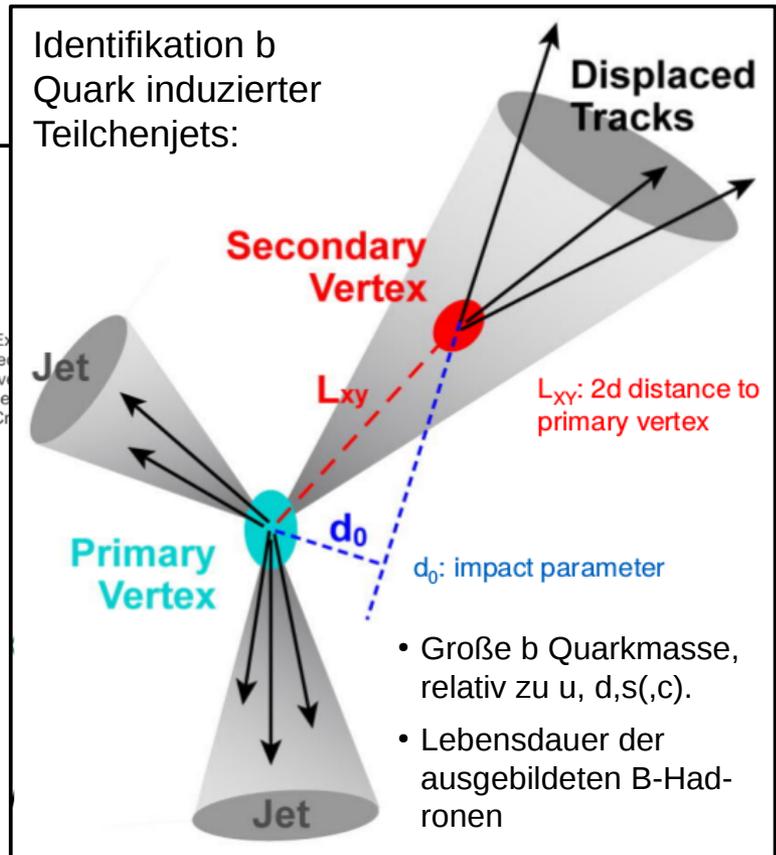
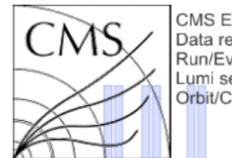
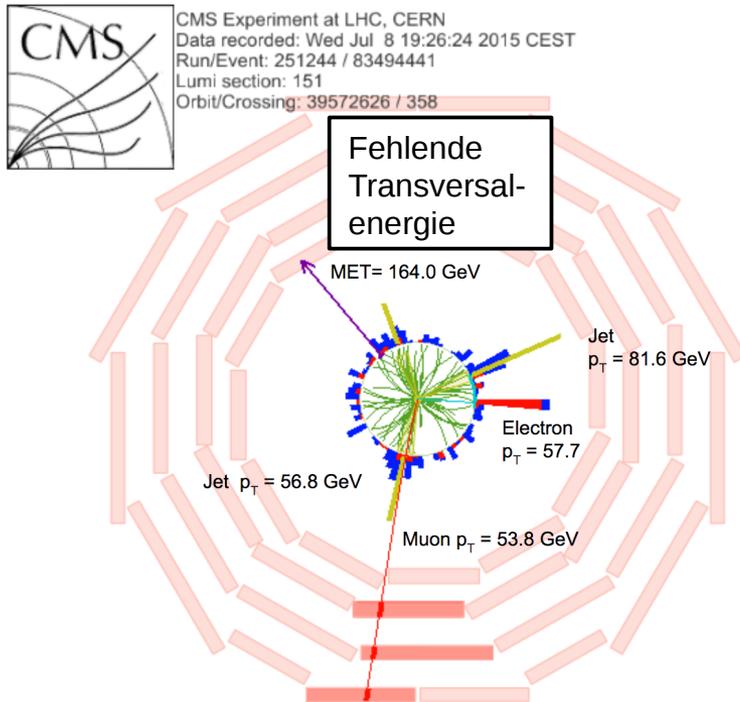
- Zerfall über schwache WW (siehe [Folie 3](#))



- Klassifikation nach Zerfall der W-Bosonen (z.B. $\mu + 2$ q jets + 2 b jets)
- Elektronen und Myonen einfach im Detektor nachweisbar (siehe [VL-05](#), [06](#), [07](#))

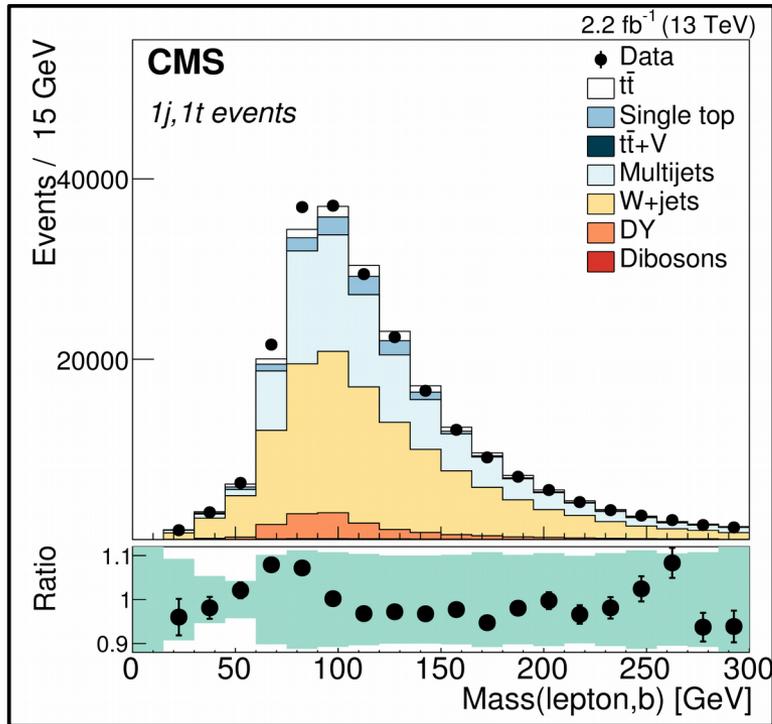
Signatur im Detektor

- Zerfall über schwache WW (siehe Folie 3)



- Klassifikation nach Zerfall der W-Bosonen (z.B. $\mu + 2 q \text{ jets} + 2 b \text{ jets}$)
- Elektronen und Myonen einfach im Detektor nachweisbar (siehe VL-05, 06, 07)

Top Quark Paare im CMS Detektor

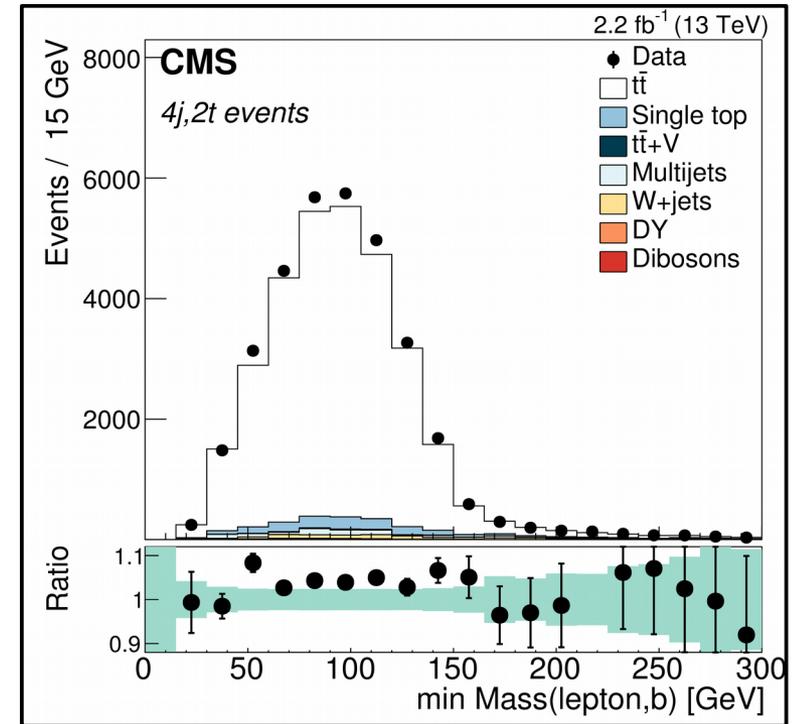
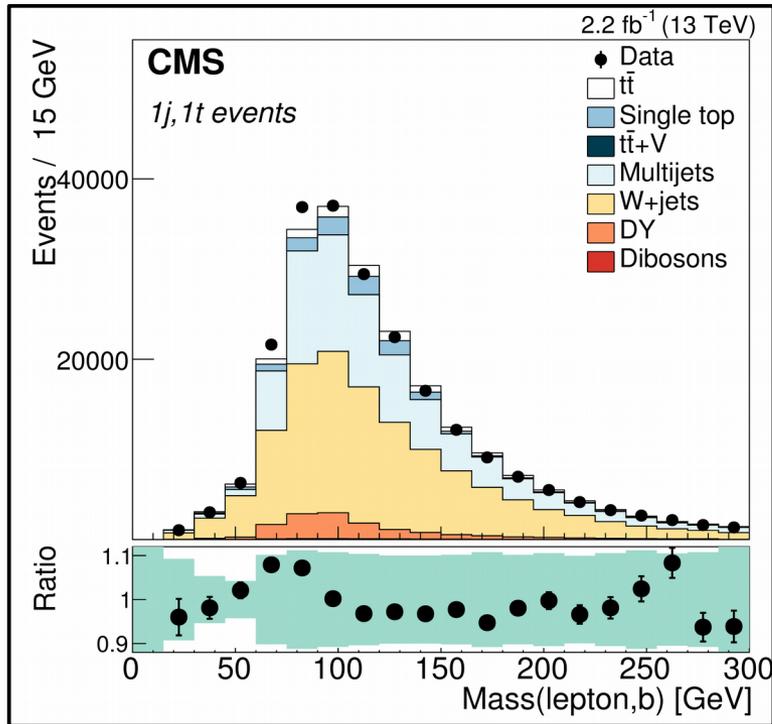


Auswahl:

- Isoliertes Elektron/Myon
- Fehlende Transversalenergie
- 1 b Quark induzierter Teilchenjet⁽¹⁾

⁽¹⁾ oberhalb einer gewissen Schwelle der transversalen Energie.

Top Quark Paare im CMS Detektor



Auswahl:

- Isoliertes Elektron/Myon
- Fehlende Transversalenergie
- 1 b Quark induzierter Teilchenjet⁽¹⁾

Auswahl:

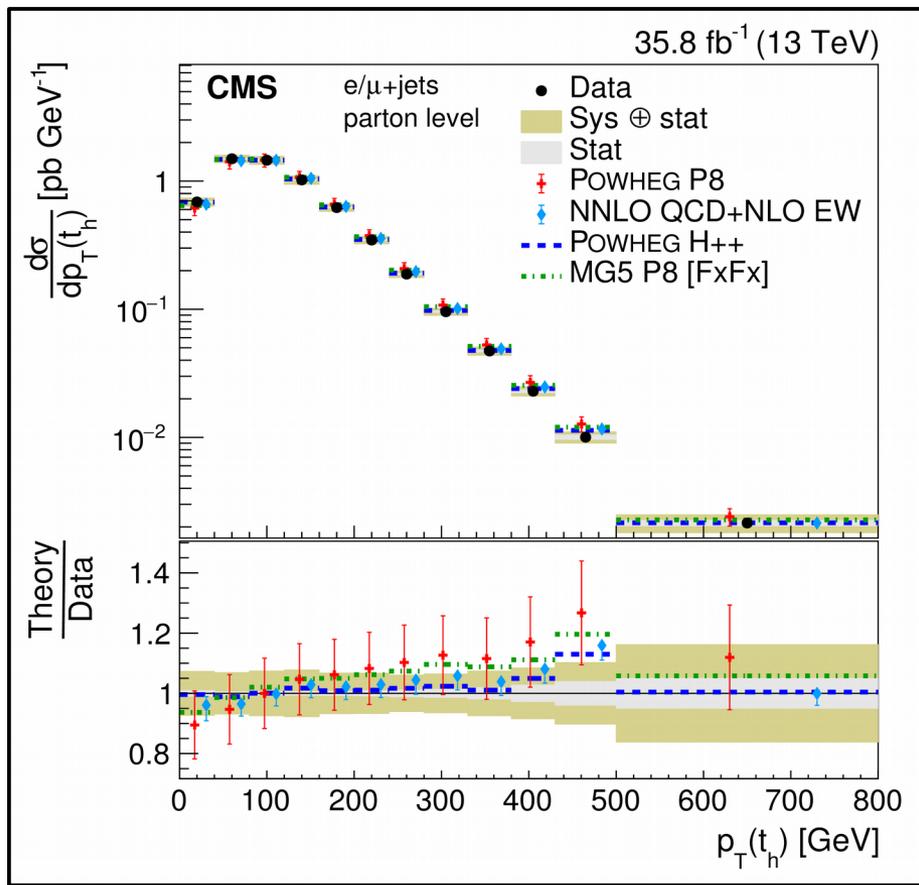
- Isoliertes Elektron/Myon
- Fehlende Transversalenergie
- 2 b Quark induzierte Teilchenjets⁽¹⁾
- 4 Teilchenjets insgesamt⁽¹⁾

⁽¹⁾ oberhalb einer gewissen Schwelle der transversalen Energie.

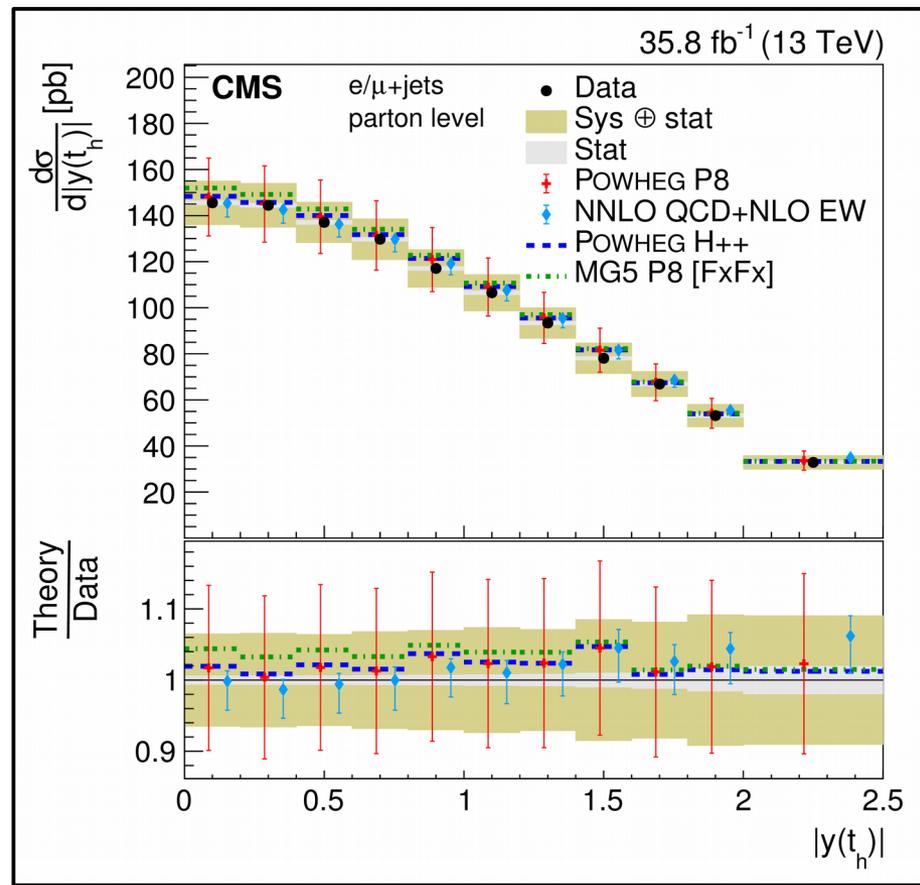
Produktion von Top Quarks

Differentielle Wirkungsquerschnitte

- Sensitiv auf Matrixelement



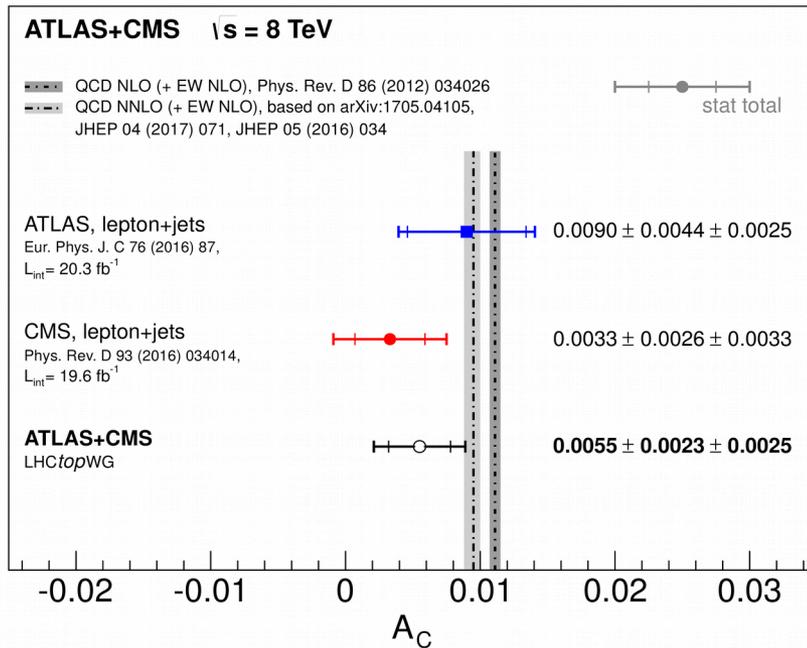
- Sensitiv auf Impulsverteilung der Partonen im Proton



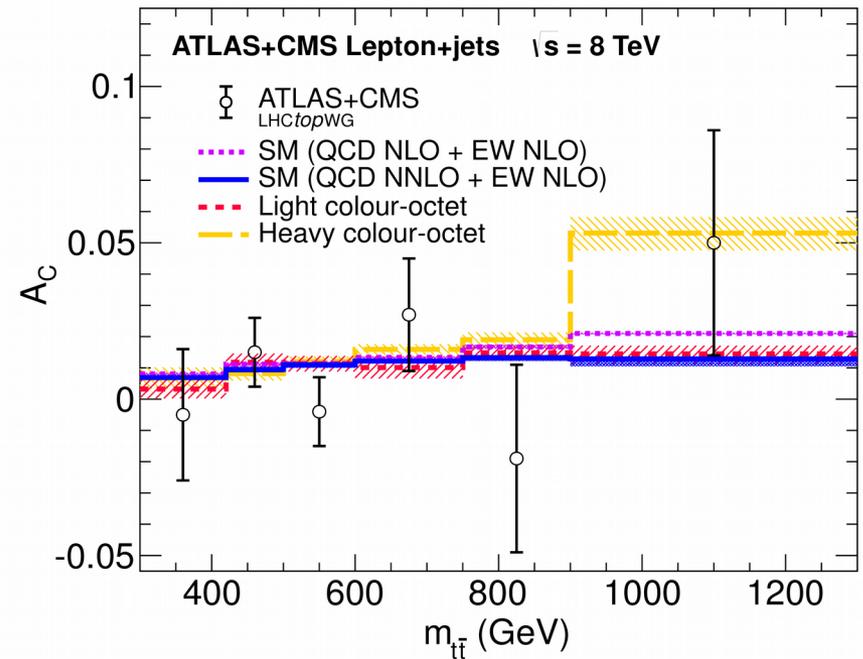
Ladungsasymmetrie

- Messe Asymmetrie zwischen ℓ^- und ℓ^+ ($\ell = \mu, e$) in dileptonischen $t\bar{t}$ -Zerfällen

Inklusiv:

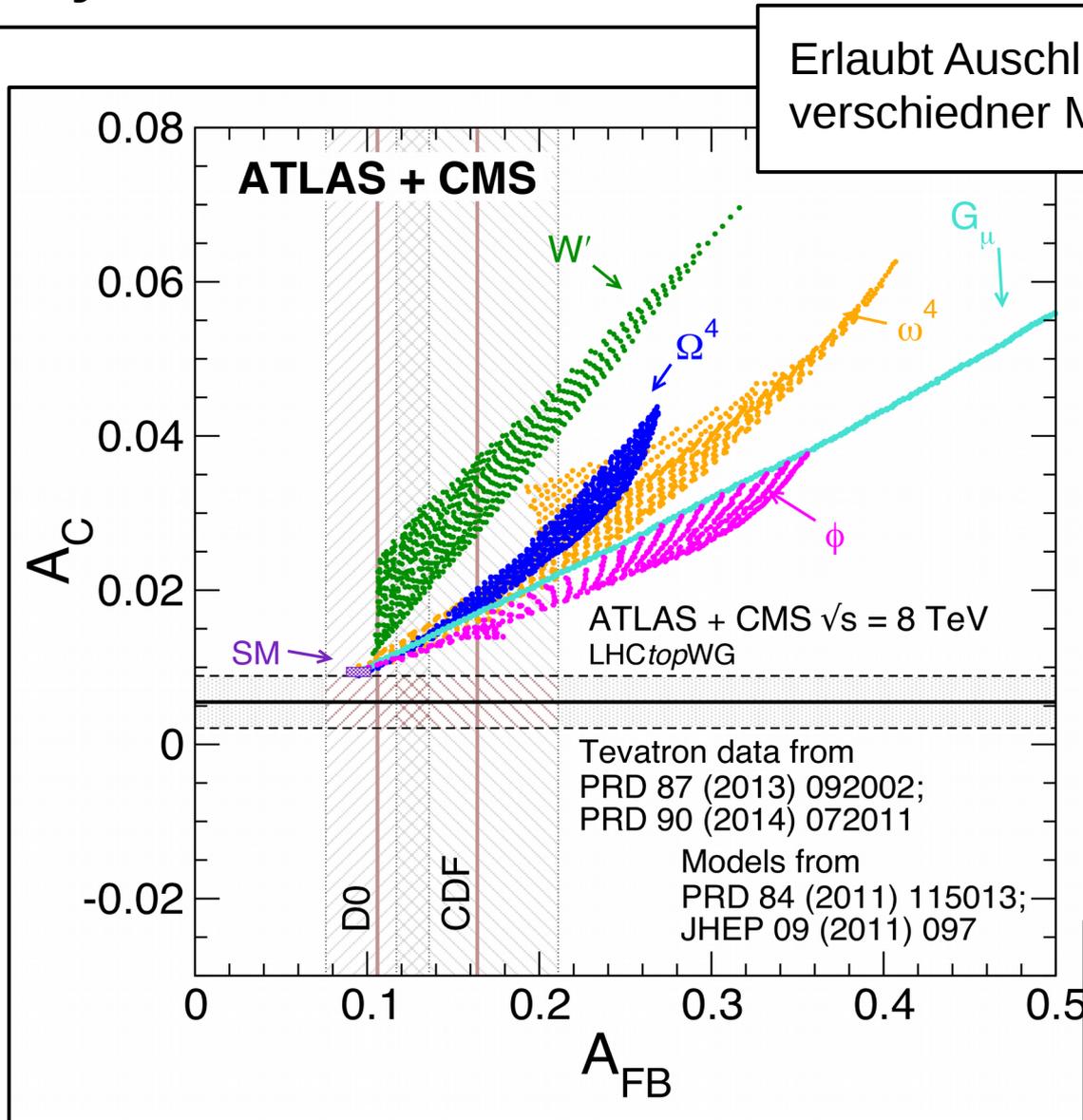


Differentiell in $m_{t\bar{t}}$:



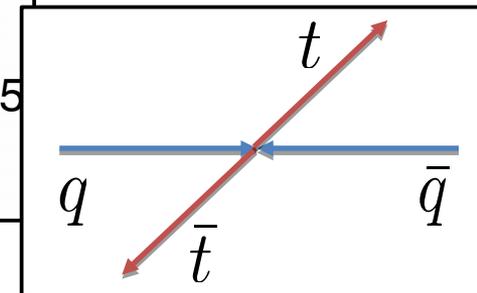
- Keine Asymmetrie in führender Ordnung, geringer Effekt in höherer Ordnung
- Messung erlaubt Rückschlüsse auf Physik jenseits des SM

Ladungsasymmetrie



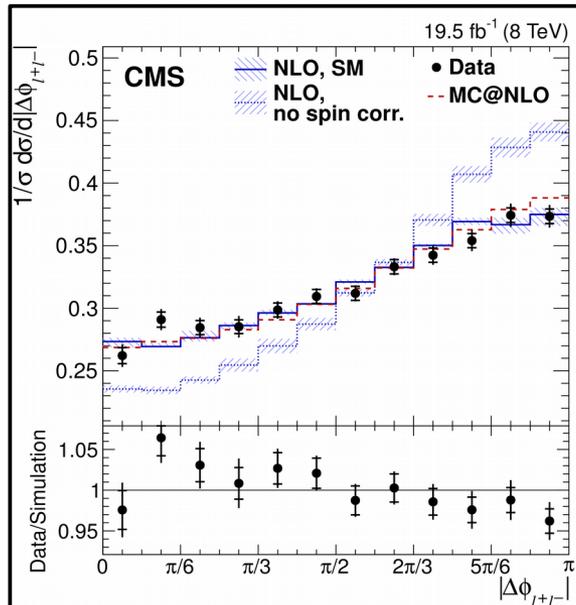
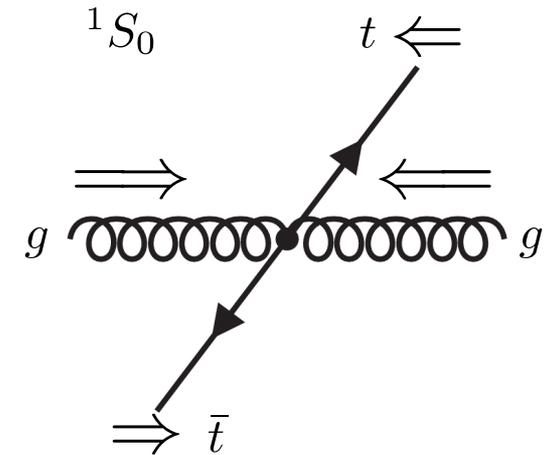
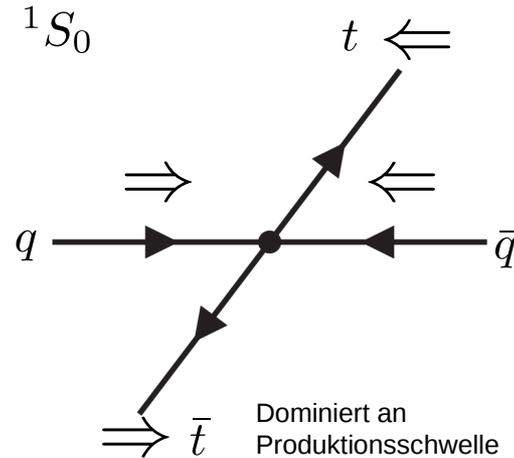
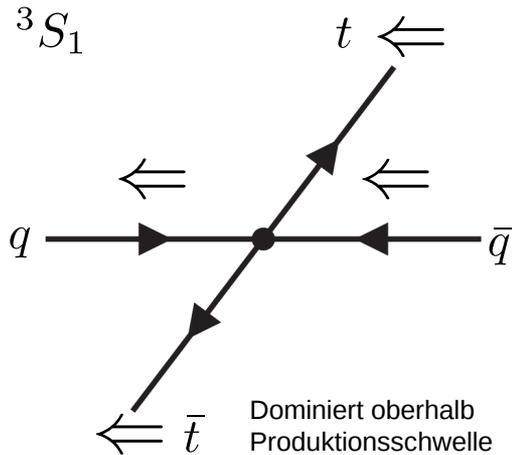
Erlaubt Ausschluß
verschiedener Modelle

Vorwärts-Rückwärtsasymmetrie (Tevatron):



Spin-Korrelationen (Produktion)

- Beiträge verschiedener Spin-Amplituden für $q\bar{q}$ -Annihilation und gg -Fusion:

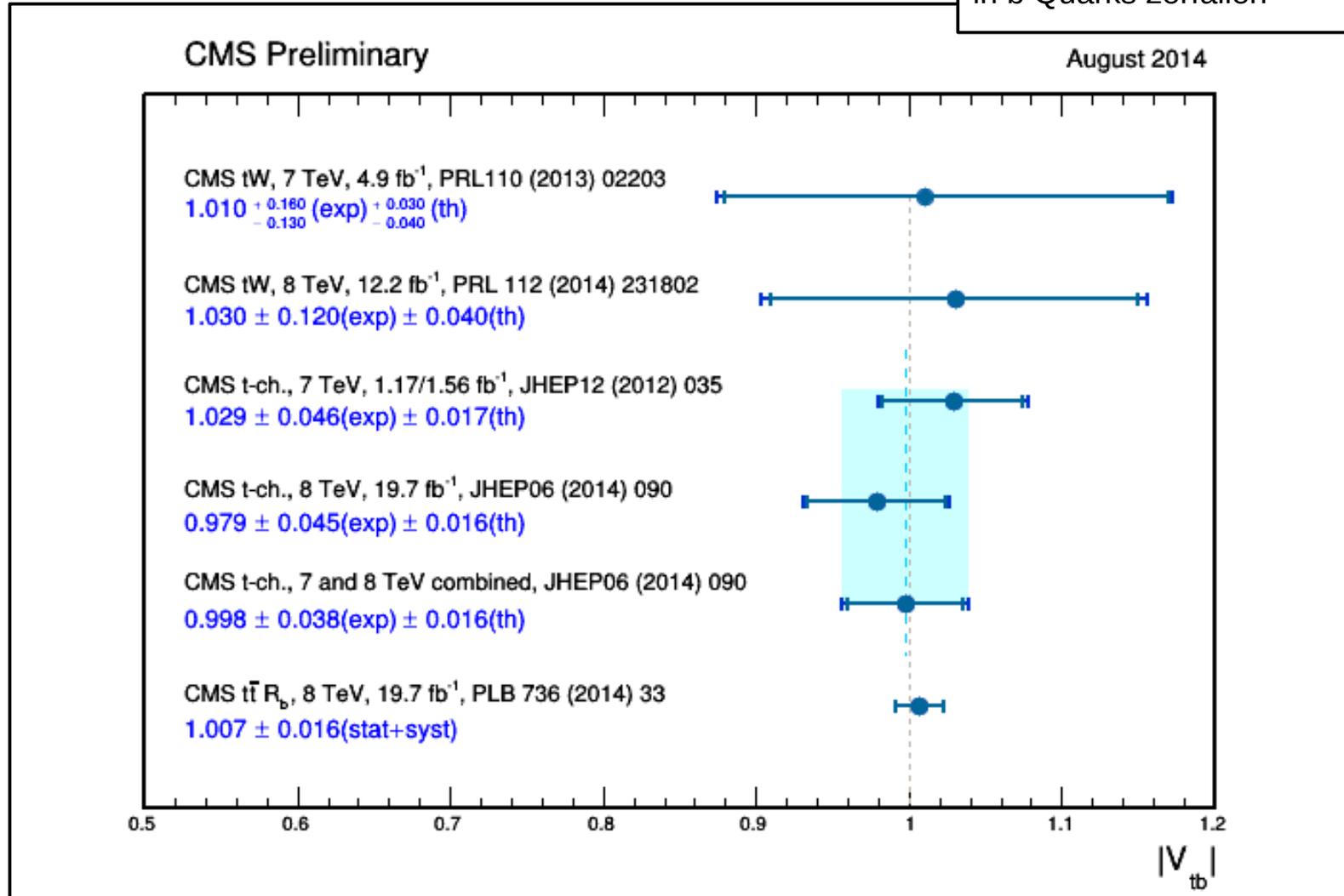


- Bestimmung aus Template-Fit (für jede Amplitude)
- Erlaubt Test der QCD (über Produktionsmechanismus) + der Spin Struktur des Top Quarks
- Limits auf Beiträge supersymmetrischer Topsquark Partner
- Limits auf chromo-magnetische und -elektrische Dipolmomente

Zerfall des Top Quarks

Bestimmung von V_{tb}

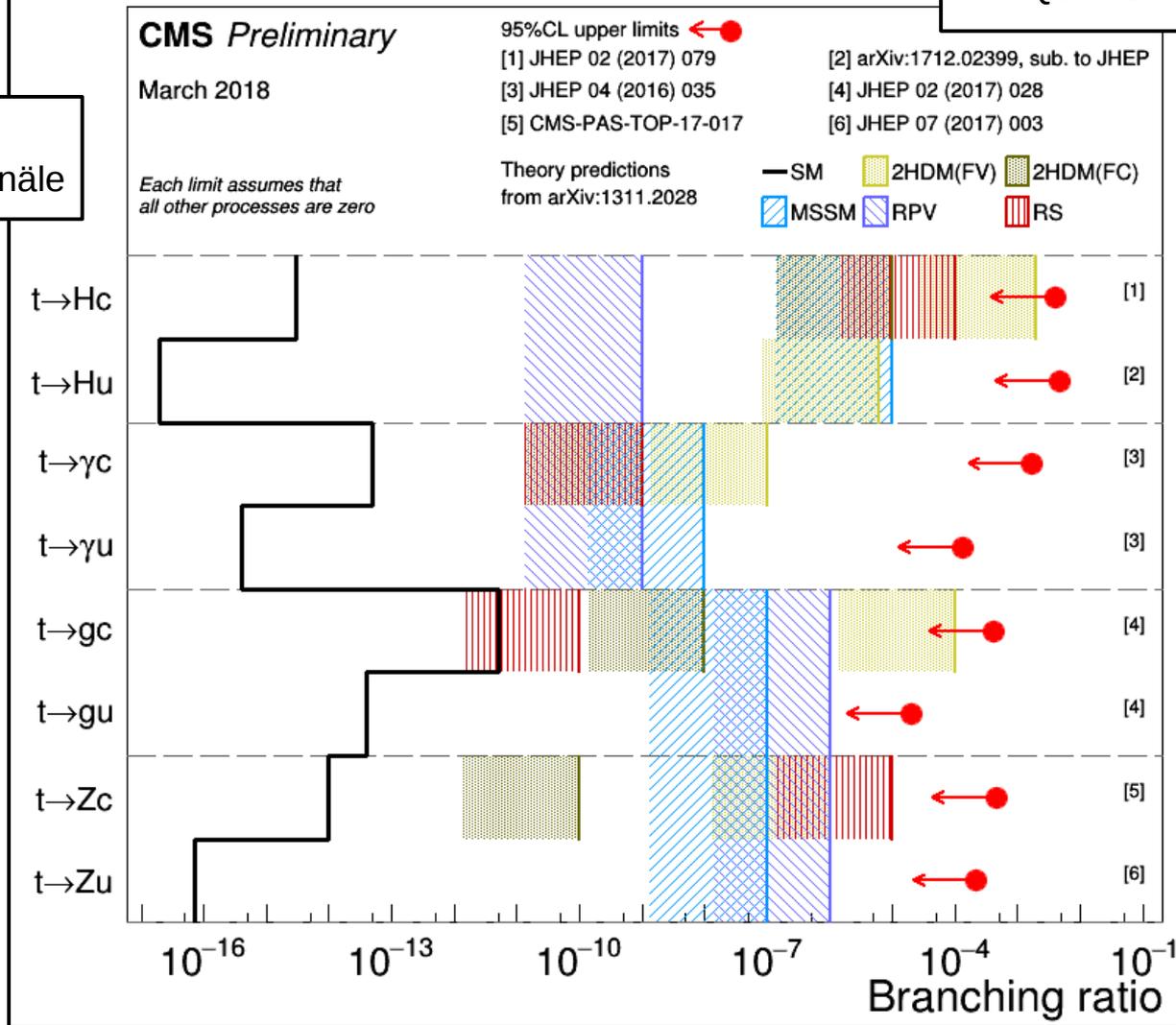
Suche Top Quarks, die nicht
in b Quarks zerfallen



Suche nach FCNC

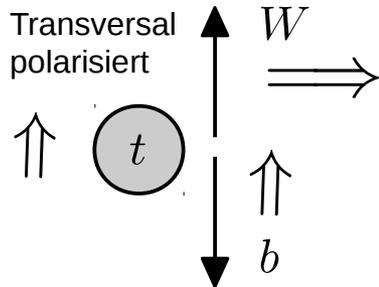
Suche Top Quarks, die nicht in b Quarks zerfallen

Explizite
Zerfallskanäle

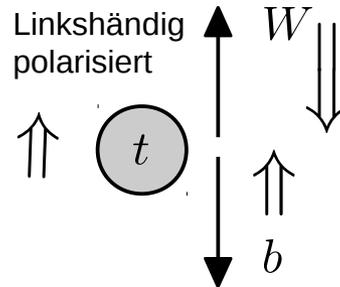


W-Helizität (Zerfall)

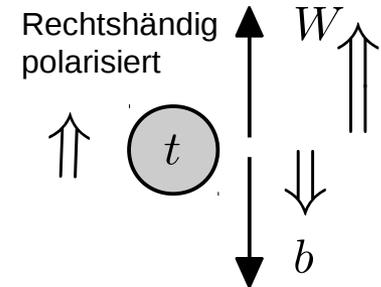
- Der Wtb -Vertex bestimmt die Helizitätszustände des W-Bosons:



$$F_0 = 0.687 \pm 0.005$$

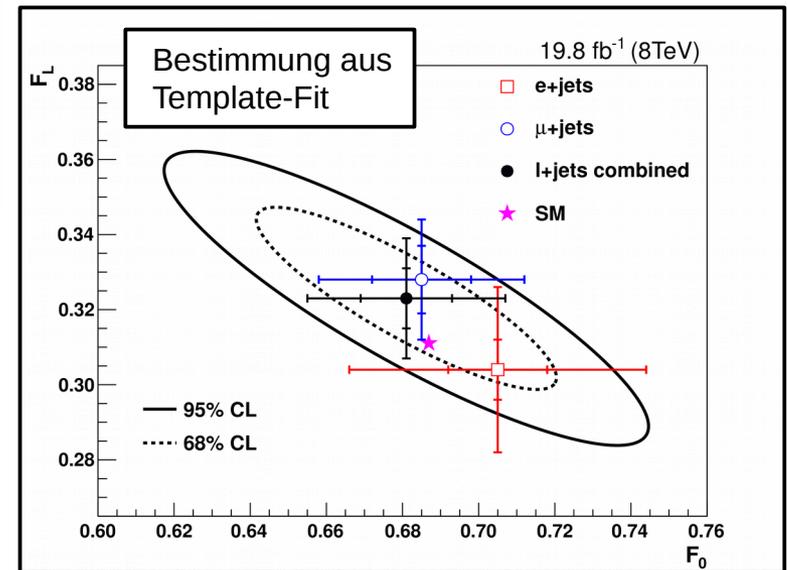
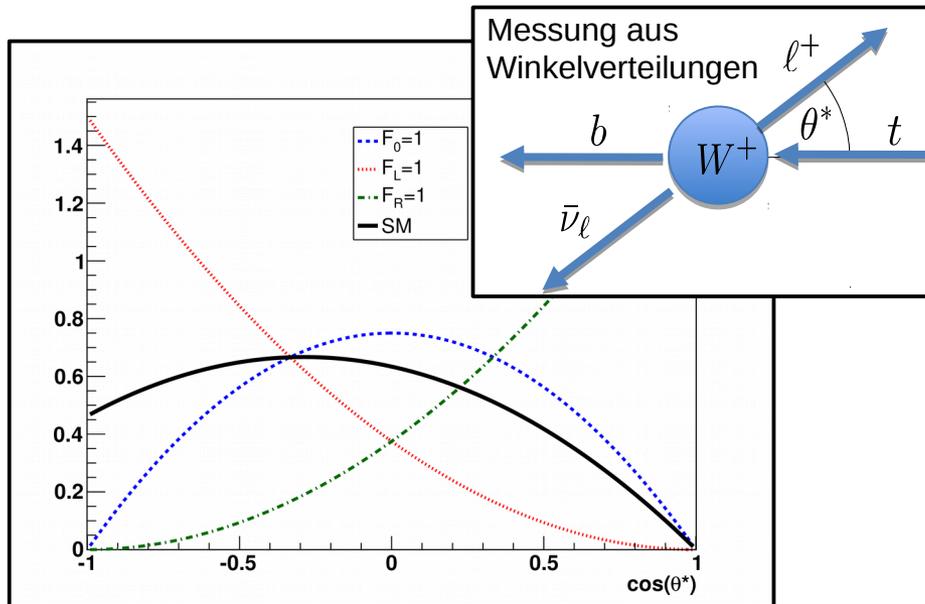


$$F_L = 0.311 \pm 0.005$$



$$F_R = 0.0017 \pm 0.0001$$

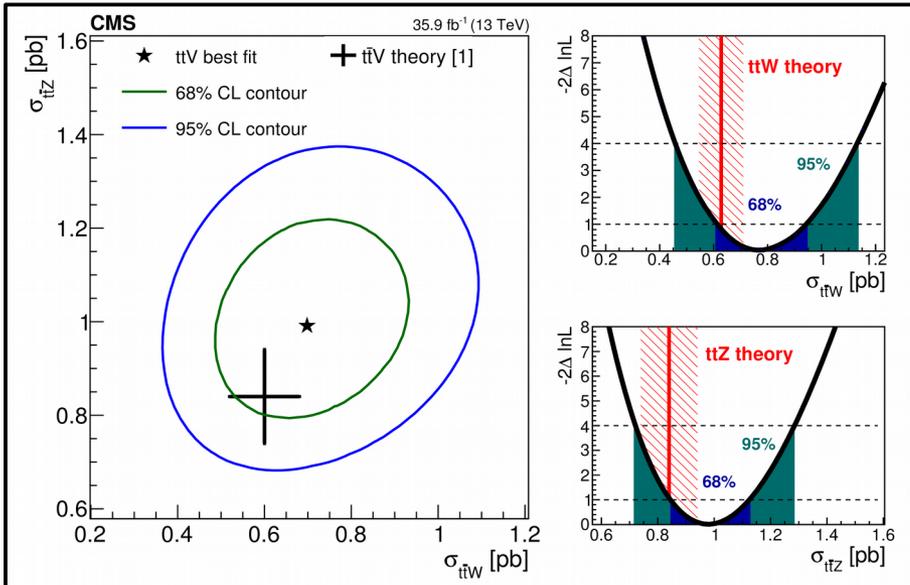
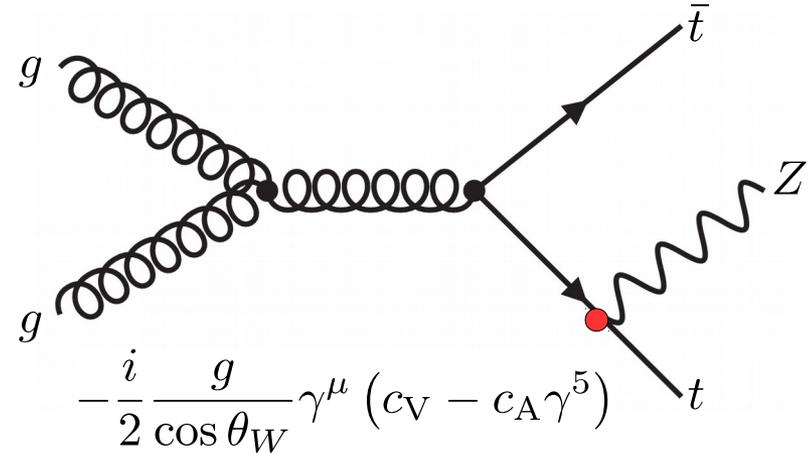
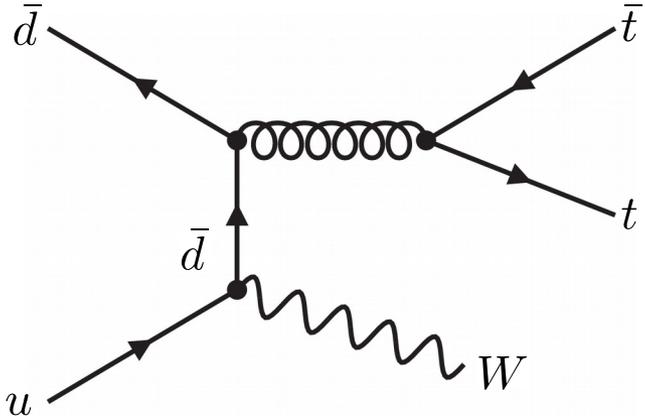
@ NNLO QCD precision



Produktion von $t\bar{t}$ Paaren in Assoziation mit Eichbosonen

$$t\bar{t} + W / t\bar{t} + Z$$

- Test der schwachen Kopplungsstruktur des Top Quarks:



$$c_V = T_3 - 2Q \sin^2 \theta_W$$

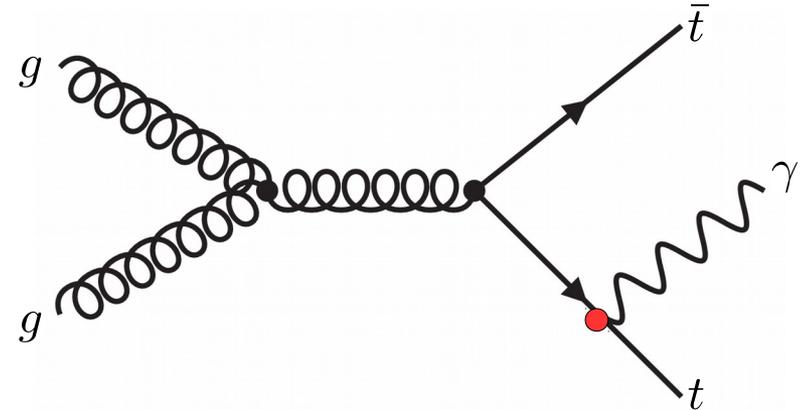
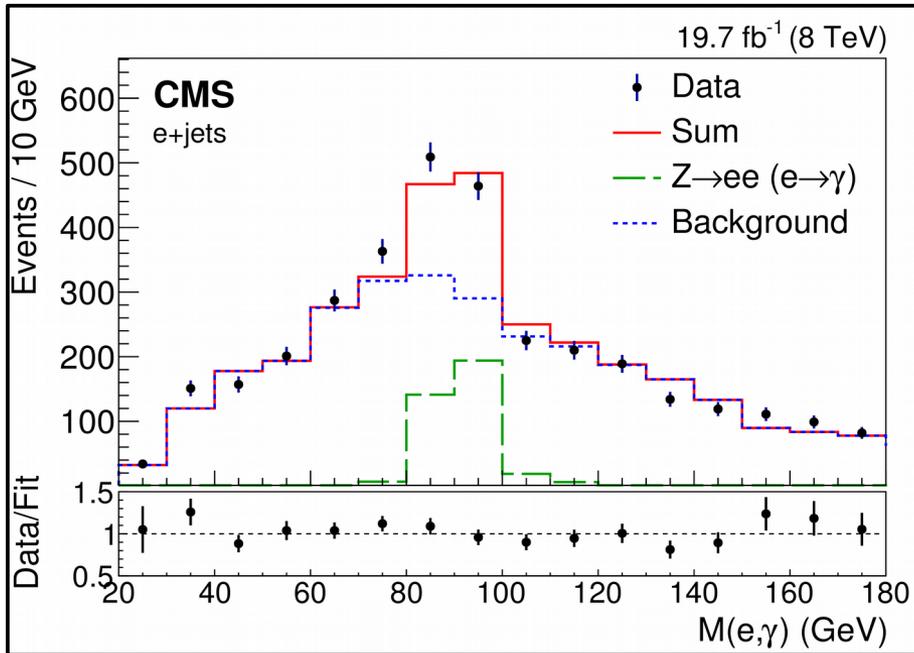
$$c_A = T_3$$

Dritte Komponente der
SU(2)_L (siehe VL-17 Folie 7)

NB: das sind nicht die einzigen
beitragenden Diagramme

$$t\bar{t} + \gamma$$

- Test der elektrischen Ladung des Top Quarks:



- Messung von $R = \sigma_{t\bar{t}\gamma} / \sigma_{t\bar{t}}$ in eingegrenzktem Phasenraum:

$$R = (5, 7 \pm 1, 8) \times 10^{-4} (\text{stat+syst}) \text{ (e+jets)}$$

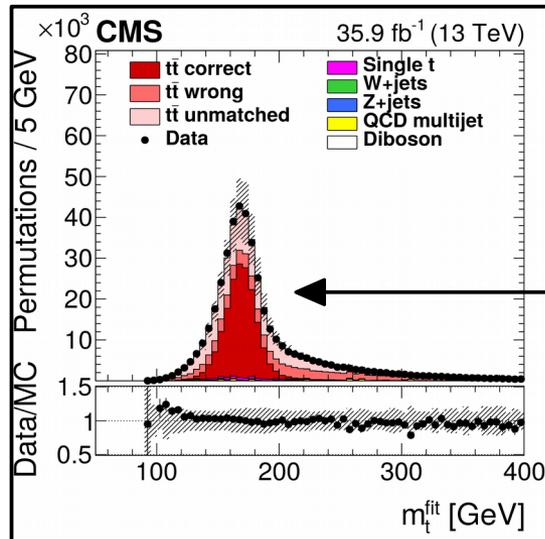
$$R = (4, 7 \pm 1, 3) \times 10^{-4} (\text{stat+syst}) \text{ (\mu+jets)}$$

- Messung kompatibel mit $z_t = 2/3$ (siehe [Folie 5](#))

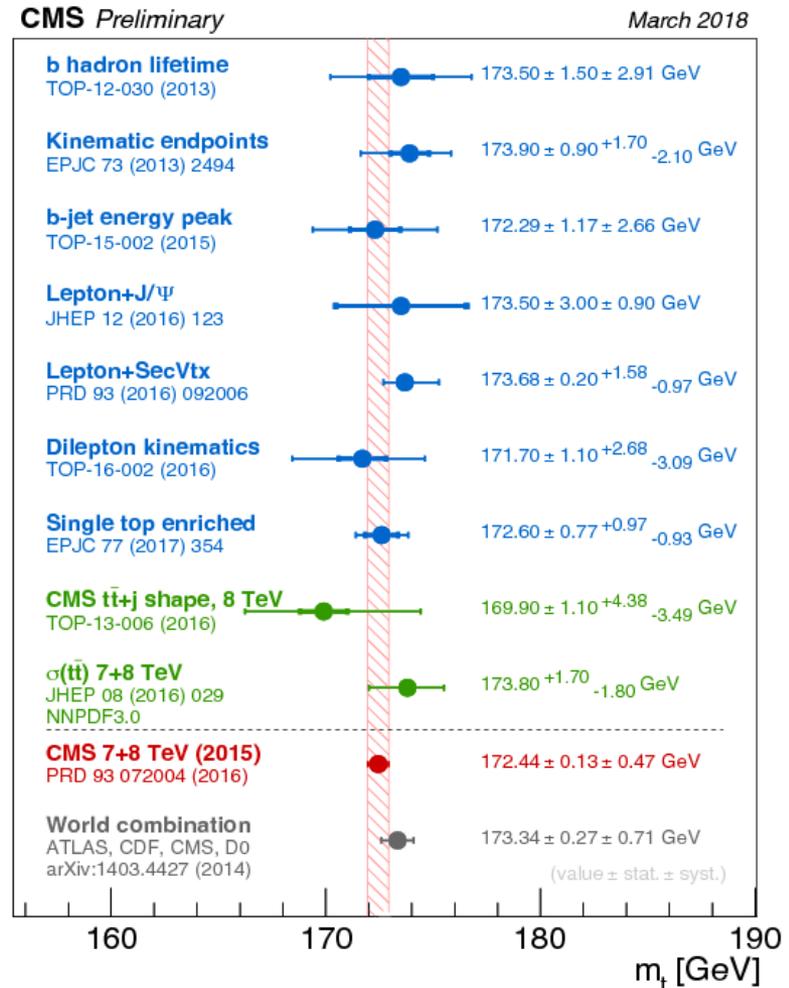
Masse des Top Quarks

Masse des Top Quarks

- Standardmethoden:
 - **Matrixelement Methode:** Verwende m_t in LO Matrixelement als freien Fitparameter und Transferfunktionen (aus Simulation) für Detektorauflösung.
 - **Ideogramm Methode:** Interpoliere zwischen Templates für mit m_t korrelierte Variablen aus Simulation.

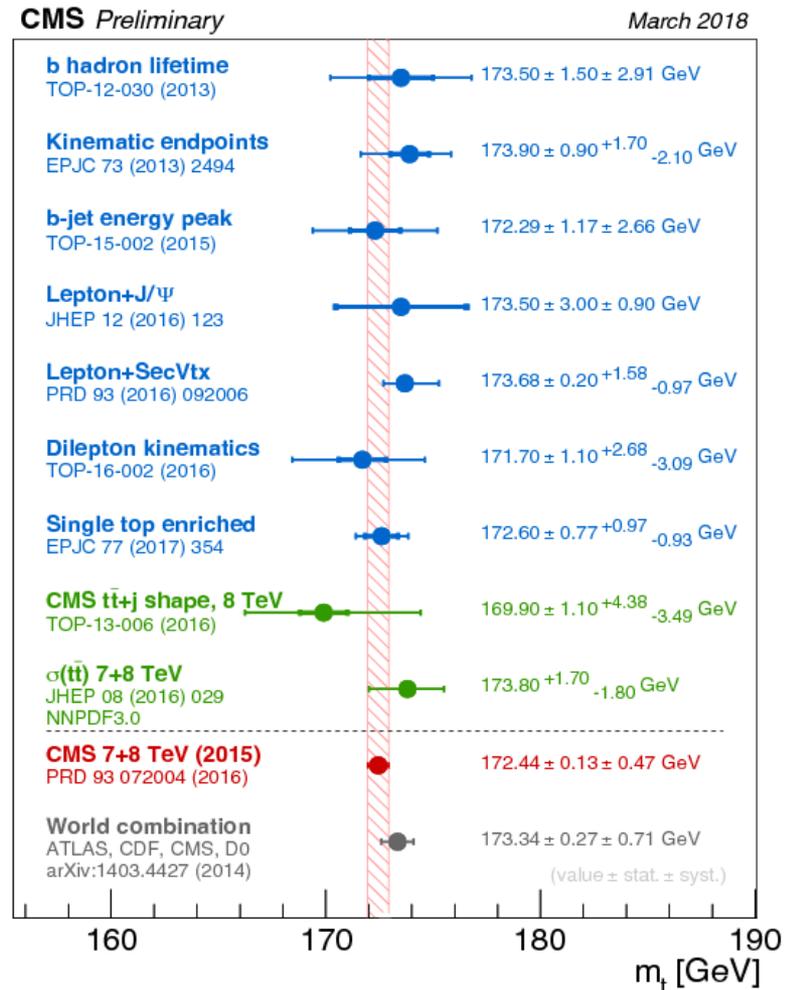


- Alternative Methoden:



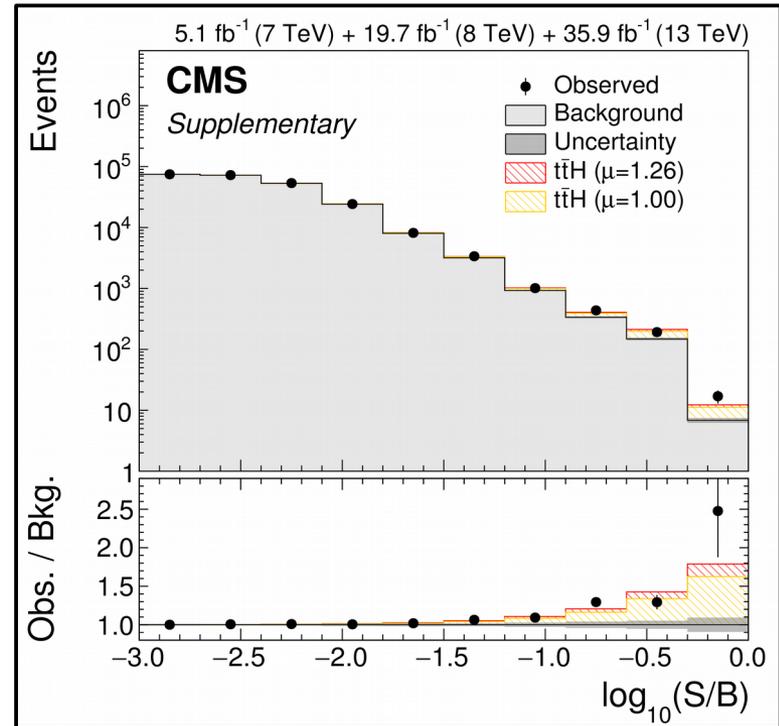
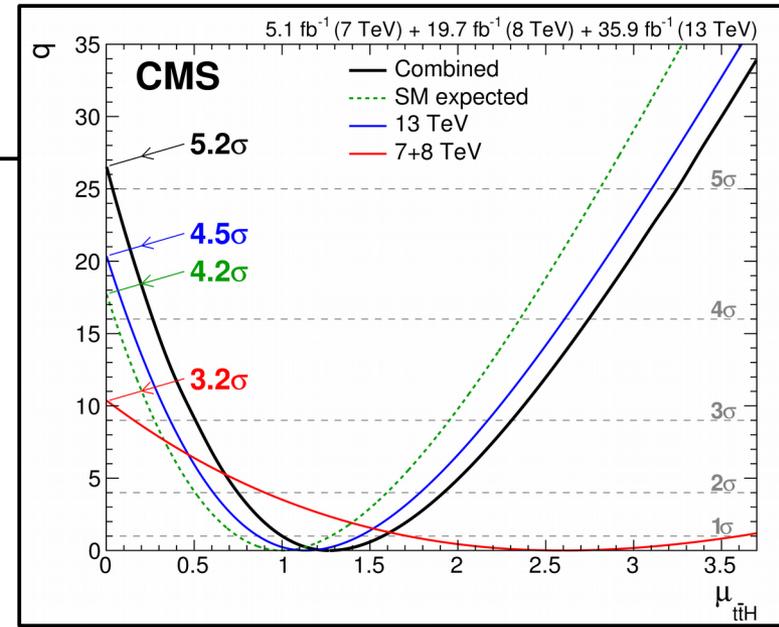
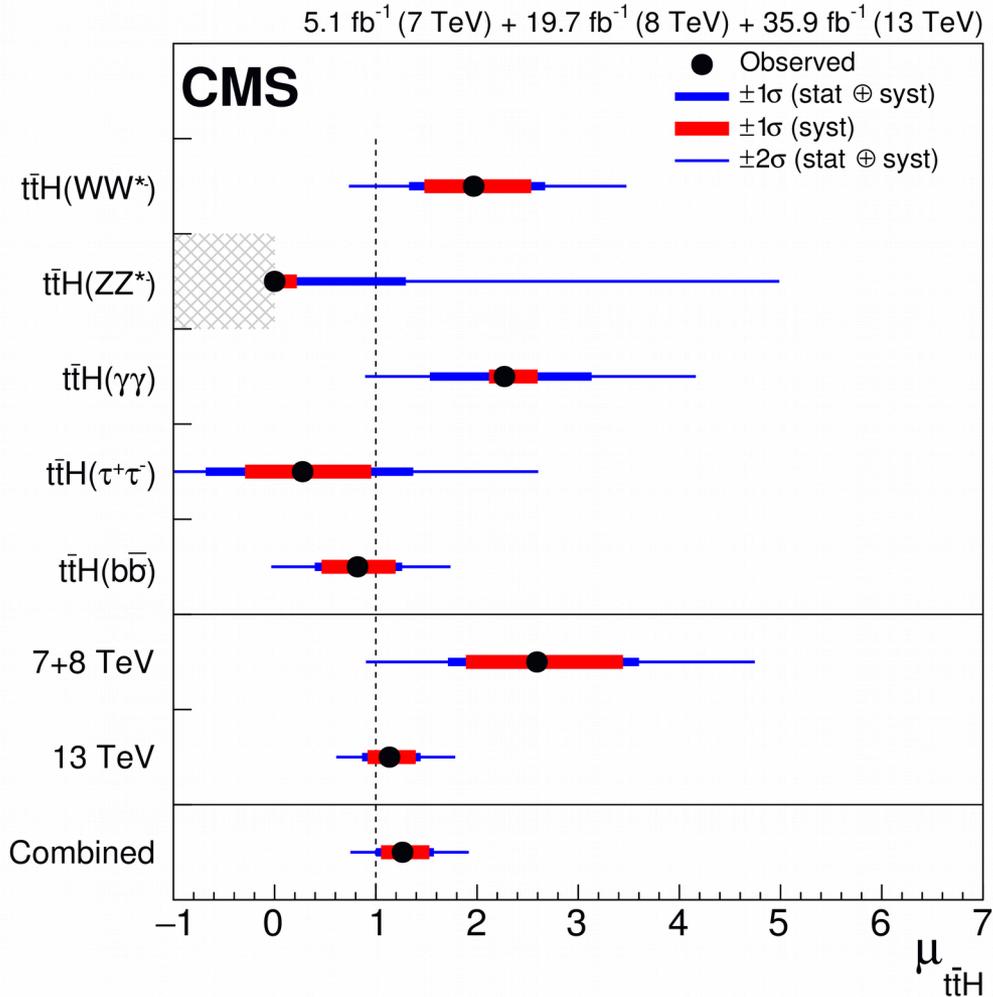
Masse des Top Quarks

- Welche Masse wird tatsächlich gemessen?
- Bestimmung aus Endzustand modellbehafet (Hadronisationsmodelle)
- Modellunabhängige Bestimmung der Polmasse aus Wirkungsquerschnitt (hängt über Propagatorterme von Polmasse ab)



$t\bar{t} + H$

- Kürzlich: $\geq 5\sigma$ Entdeckung der Top Quark assoziierten Higgsboson-Produktion:



Das Top Quark im Higgs Sektor

- Yukawa-Kopplung im SM:

$$\mathcal{L}_t^{\text{Yukawa}} = -f_t v \bar{t}t - f_t \frac{H}{\sqrt{2}} \bar{t}t$$

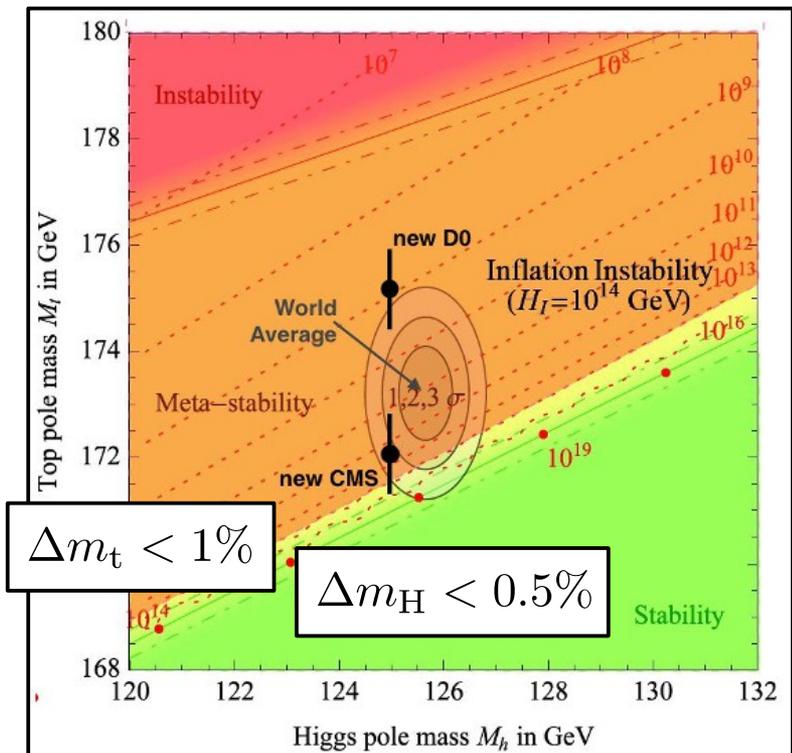
$$f_t \equiv \frac{m_t}{v}$$

$m_t = 175 \text{ GeV}$ (Top Quark Masse)

$$v = 246 \text{ GeV}$$

(Vakuumerwartungswert)

- D.h. Kopplung an das Higgs Boson im SM von der Ordnung 1
- Konstellation aus Top Quark, W Boson und Higgs Boson Masse nahe an Grenze zur Metastabilität des Universums



Gliederung der Vorlesung



Vorlesung:	Vorlesungstag:	Übungsblatt:
VL-01 Einheiten, Relativistische Kinematik	Di 17.04.2018	-
VL-02 Teilchenstreuung	Do 19.04.2018	-
VL-03 Wirkungsquerschnitt	Di 24.04.2018	Blatt-01
VL-04 Teilchenbeschleunigung	Do 26.04.2018	-
Vorlesung fällt aus	Di 01.05.2018	Blatt-02
VL-05 Teilchennachweis durch Ionisation	Do 03.05.2018	-
VL-06 Elektromag. WW und Schauer	Di 08.05.2018	Blatt-03
Vorlesung fällt aus	Do 10.05.2018	-
VL-07 Detektoren der Teilchenphysik	Di 15.05.2018	Blatt-04
VL-08 Symmetrien und Erhaltungsätze	Do 17.05.2018	-
VL-09 Fundamentale Teilchen und Kräfte im SM	Di 22.05.2018	Blatt-05
VL-10 Diskrete Symmetrien des SM	Do 24.05.2018	-
VL-11 Teilchenzoo: vom Hadron zum Quark	Di 29.05.2018	Blatt-06
Vorlesung fällt aus	Do 31.05.2018	-
VL-12 Farbladung und QCD	Di 05.06.2018	Blatt-07
VL-13 Phänomenologie der schwachen WW	Do 07.06.2018	-
VL-14 Theorie der elektroschwachen WW	Di 12.06.2018	Blatt-08
VL-15 Higgs Mechanismus	Do 14.06.2018	-
VL-16 SM: Quarksektor	Di 19.06.2018	Blatt-09
VL-17 Top: Entdeckung und Eigenschaften	Do 21.06.2018	-
VL-18 Higgs: Entdeckung und Eigenschaften	Di 26.06.2018	-
VL-19 Neutrinoophysik	Do 28.06.2018	-

