
Entdeckung des Top-Quarks

Alexander Froch

18. Januar 2019

Experimentelle Physik IV
Fakultät Physik

Inhaltsverzeichnis

Zeitliche Einordnung

Theoretische Grundlagen

Motivation

Indirekte Messung

Analyse

CDF-Analyse

DØ-Analyse

Heutige Messungen

Ausblick

Referenzen

Zeitliche Einordnung

- 1973: Postulierung durch M. Kobayashi und T. Maskawa [1]
⇒ Erklärung für CP-Verletzung beim Kaon Zerfall
⇒ Beruht auf dem GIM-Mechanismus [2]
- 1974: Bestätigung des GIM-Mechanismus durch Entdeckung des J/Ψ Mesons
⇒ Erneute Aufmerksamkeit für Kobayashi und Maskawa
⇒ Weitere Aufmerksamkeit durch die Entdeckung des τ -Leptons am SLAC
- 1977: Entdeckung des b -Quarks vom E288-Experiment am Fermilab [3]
⇒ t -Quark sollte ebenfalls existieren
⇒ Generelle Erwartung, das t -Quark wird schnell gefunden

- 1984: Direkte Suche nach dem t -Quark am CELLO [4] (PETRA) und am SLAC
 - ⇒ Beide finden keine Hinweise
 - ⇒ Das DESY kann unteres Limit setzen: 23,3 GeV
- 1990: Suche an e^+e^- -Collidern mit VENUS [5] (KEK) und OPAL [6] (LEP)
 - ⇒ Untere Limits: $m_{\text{VENUS}} > 30,2 \text{ GeV}$, $m_{\text{OPAL}} > 44,5 \text{ GeV}$
- 1990: Suche mit UA2 [7] (SppS) am CERN
 - ⇒ Unteres Limit: $m_{\text{UA2}} > 69 \text{ GeV}$
- 1995: Entdeckung des t -Quarks mit CDF [8] und DØ [9] (Tevatron)
 - ⇒ $m_t = 176 \pm 18 \text{ GeV}$

Zeitliche Einordnung

Theoretische Grundlagen

Motivation

Indirekte Messung

Analyse

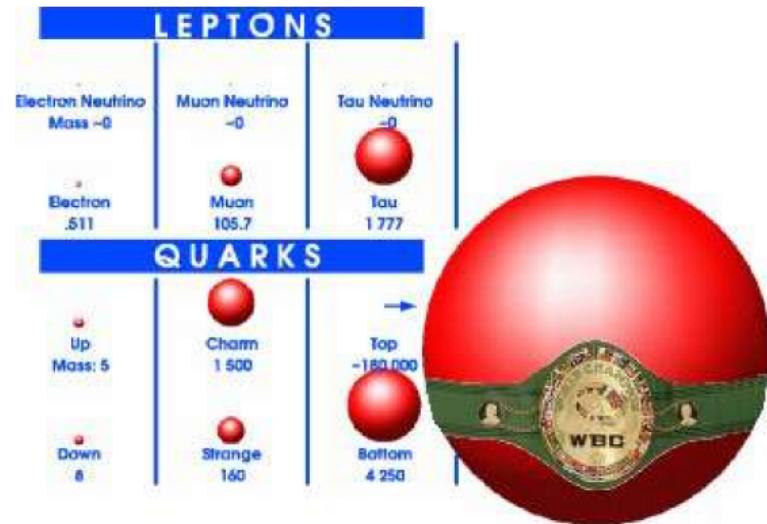
Heutige Messungen

Ausblick

Referenzen

Theoretische Grundlagen

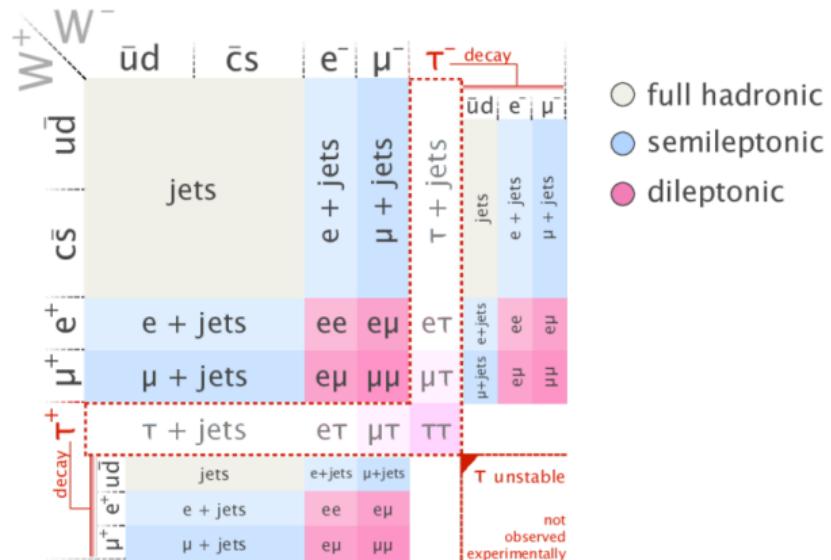
- Masse: $m_t = (173,1 \pm 0,6)$ GeV [10]
- Lebensdauer: $\tau \approx (5 \cdot 10^{-25})$ s [11]
- Isospin: $T_3 = \frac{1}{2}$
- Ladung: $Q = +\frac{2}{3}e$



Aus: K. Kröniger, Teilchenphysik 1

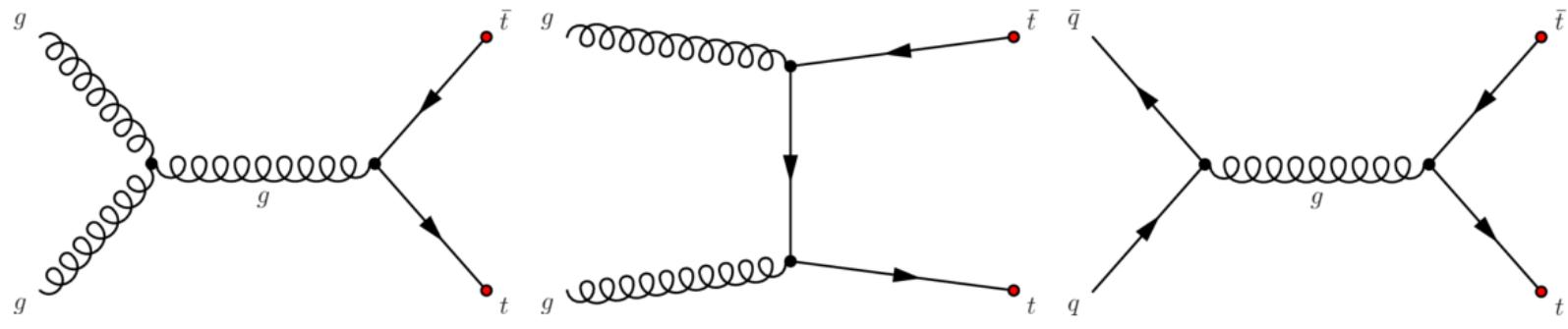
Mögliche Zerfallskanäle

- Bildet keine Baryonen \Rightarrow Zu kurze Lebenszeit
- Bildet ebenfalls keine Mesonen
- $\frac{\Gamma(W^+ b)}{\Gamma(W^+ q(q=b,s,d))} = 0,91 \pm 0,04 \Rightarrow$ Zerfällt primär in Wb

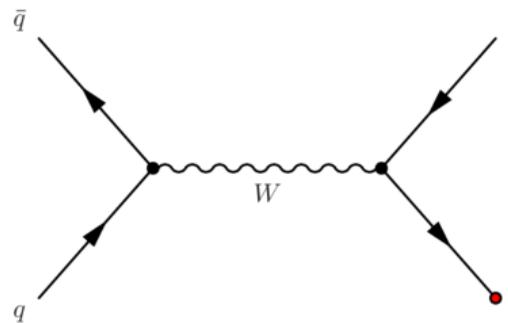


Darstellung der verschiedenen möglichen Zerfallskanäle des Top-Quarks [12].

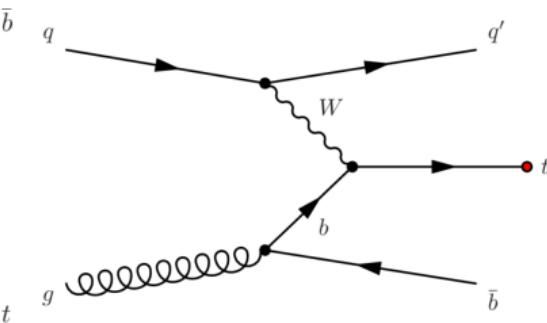
Produktionskanäle für $t\bar{t}$



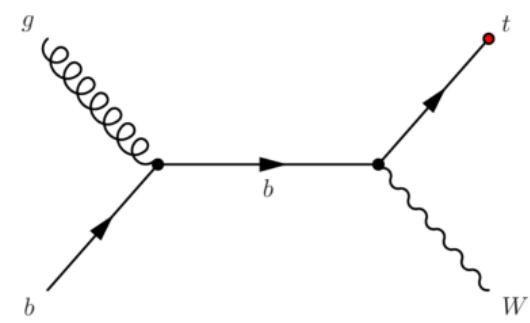
Produktionskanäle für einzeln produzierte t



s-Kanal [13].



t-Kanal [14].



tW-Kanal [15].

Zeitliche Einordnung

Theoretische Grundlagen

Motivation

Indirekte Messung

Analyse

Heutige Messungen

Ausblick

Referenzen

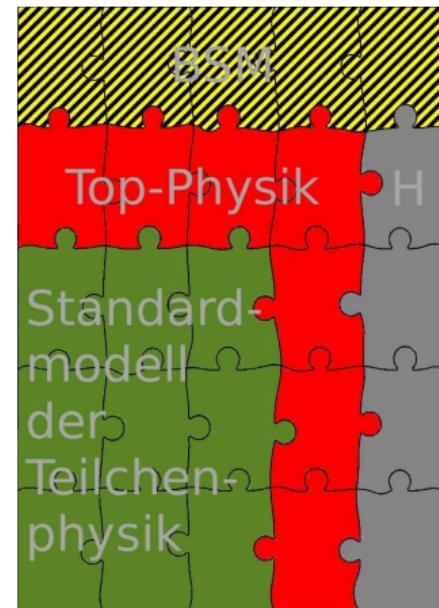
Das Top-Quark im Standardmodell

- Yukawa-Kopplung (Higgs-Kopplung):

$$\mathcal{L}_{\text{Yukawa}} (\Phi, \Psi) = -g \bar{\Psi} \Phi \Psi$$

mit $g = \sqrt{2} \cdot \frac{m}{\nu}$, $\nu = 246 \text{ GeV}$

- $g \approx 1$ für m_t
⇒ Große Kopplung zwischen t und H
- Damit: Hohe Sensitivität an BSM-Physik



Aus: K. Kröninger, Teilchenphysik 1

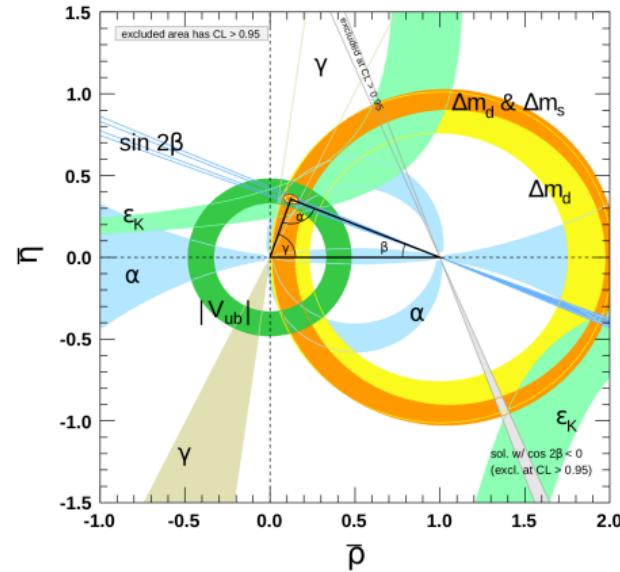
■ CKM-Matrix:

$$\begin{pmatrix} d' \\ s' \\ b' \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} V_{ud} & V_{us} & V_{ub} \\ V_{cd} & V_{cs} & V_{cb} \\ \boxed{V_{td}} & \boxed{V_{ts}} & \boxed{V_{tb}} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} d \\ s \\ b \end{pmatrix}$$

$$\begin{pmatrix} 0,97419 \pm 0,00022 & 0,2257 \pm 0,0010 & 0,00359 \pm 0,00016 \\ 0,2256 \pm 0,0010 & 0,97334 \pm 0,00023 & 0,0415^{+0,0010}_{-0,0011} \\ 0,00874^{+0,00026}_{-0,00037} & 0,0407 \pm 0,0010 & 0,999133^{+0,000044}_{-0,000043} \end{pmatrix}$$

■ CKM-Matrix **fast** unitär

⇒ Schließt vierte Generation Quarks nicht aus



Darstellung der Einschränkungen durch die CKM-Matrix in der $\bar{\rho}, \bar{\eta}$ Ebene [16].

Zeitliche Einordnung

Theoretische Grundlagen

Motivation

Indirekte Messung

Analyse

Heutige Messungen

Ausblick

Referenzen

Erste Hinweise

- Erste Suche im R -Verhältnis:

$$R = \frac{\sigma(e^+e^- \rightarrow \text{Hadronen})}{\sigma(e^+e^- \rightarrow \mu^+\mu^-)}$$

- Vertex bei Hadronen-Erzeugung ist proportional zur elektrischen Ladung der Quarks
- Faktor 3 durch Farbladung
- Messung ergibt $R \approx 5$
- Gängige R -Plots zeigen kein Top-Quark
 \Rightarrow Zu kleine Schwerpunktsenergie

$$R(u,d,s) = 3 \cdot \left[\left(\frac{2}{3}\right)^2 + \left(-\frac{1}{3}\right)^2 + \left(-\frac{1}{3}\right)^2 \right] = 2$$

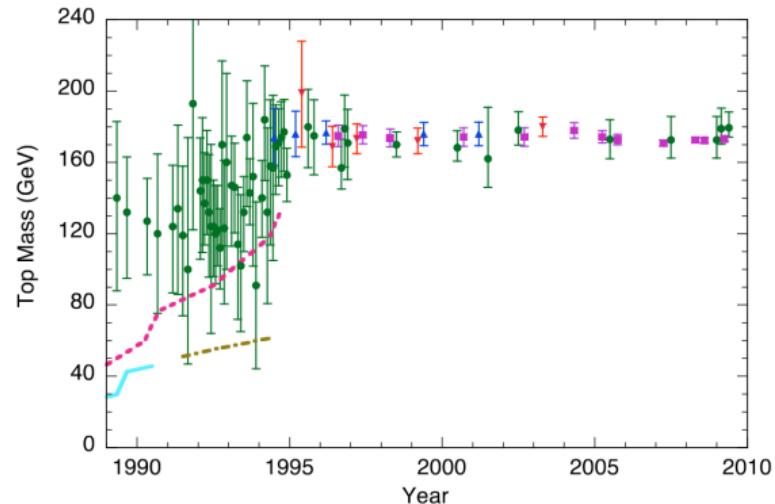
$$R(u,d,s,c) = 3 \cdot \left[\dots + \left(\frac{2}{3}\right)^2 \right] = \frac{10}{3}$$

$$R(u,d,s,c,b) = 3 \cdot \left[\dots + \left(-\frac{1}{3}\right)^2 \right] = \frac{11}{3}$$

$$R(u,d,s,c,b,t) = 3 \cdot \left[\dots + \left(\frac{2}{3}\right)^2 \right] = \frac{15}{3}$$

Massenbestimmung

- Hohe Sensitivität elektroschwacher Observablen auf m_t
- Beispiel: Loop-Korrekturen der W - und Z -Masse
- Grüne Punkte: Fit an elektroschwache Observablen:
→ Blaue Dreiecke: CDF
→ Rote umgedrehte Dreiecke: D \emptyset
→ Magenta Rechtecke: Tevatron Durchschnitt



Top Masse in den vergangenen Jahren [17].

Zeitliche Einordnung

Theoretische Grundlagen

Motivation

Indirekte Messung

Analyse

CDF-Analyse

D \emptyset -Analyse

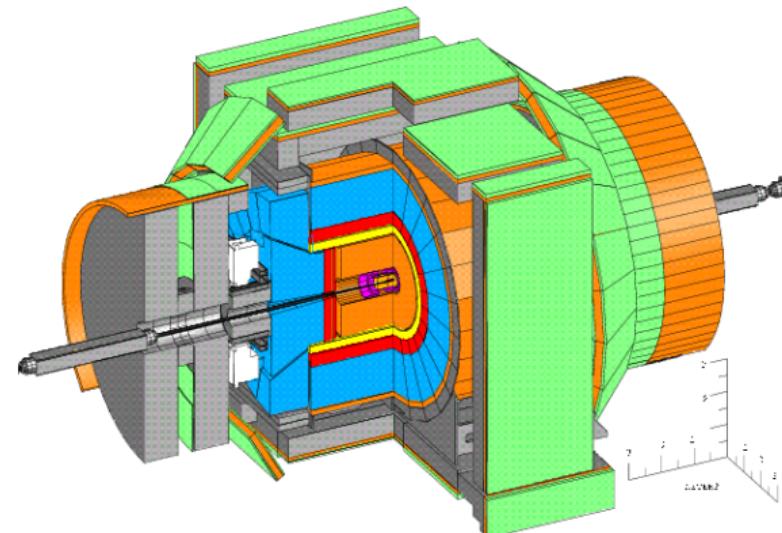
Heutige Messungen

Ausblick

Referenzen

Das CDF-Experiment

- Magnetisches Spektrometer umgeben von Kalorimetern und Myonen-Kammern
- Vierlagiger Silikon Vertex Detektor (Magenta) zur Rekonstruktion der Spuren \Rightarrow Bietet Möglichkeit der Rekonstruktion sekundärer Vertices
- Central Tracking Chamber (CTC) (Orange) zur Bestimmung der Impulse der geladenen Teilchen
- Elektromagnetisches (Rot) und hadronisches Kalorimeter (Blau) zur Bestimmung der Energien der Jets und Leptonen mit $|\eta| < 4,2$. Zudem Bestimmung des E_T^{miss}
- Driftkammern (Grün) mit $|\eta| < 1,0$ zur Myonen-Identifikation.



Schematische Darstellung des CDF-Experiments [18].

Event-Selektion

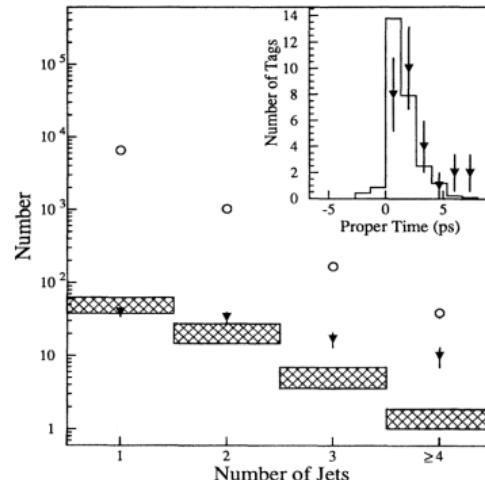
- Analyse im Kanal $t\bar{t} \rightarrow WbW\bar{b}$
- Datensatz: 67 pb^{-1} bei $\sqrt{s} = 1,8 \text{ TeV}$
- Unterkanäle:
 - ⇒ Dilepton ($WW \rightarrow e\mu, ee, \mu\mu$)
 - ⇒ Semileptonisch ($WW \rightarrow e, \mu + \text{Jets}$)
- Dilepton Ereignisse mit $75 \text{ GeV} \leq m_{ee}, m_{\mu\mu} \leq 105 \text{ GeV}$ werden entfernt.
 ⇒ Mögliche Z - oder W -Bosonen
- Semileptonische Ereignisse werden auf sekundären Vertex (b -Zerfall) hin untersucht (SVX-Tagging)

Anzahl der Leptonen + Jets Ereignisse mit den Beobachteten SVX-Tags und den erwarteten Untergrund SVX-Tags [8]

N_{jets}	Beobachtete Ereignisse	Beobachtete SVX-Tags	Erwartete Untergrund SVX-Tags
1	6578	40	50 ± 12
2	1026	34	$21 \pm 6,5$
3	164	17	$5,2 \pm 1,7$
≥ 4	39	10	$1,5 \pm 0,4$

Bestimmung des Untergrundes

- Methode 1: Berechnung der falschen SVX-Tags und der schwereren Quarkpaar-Produktion ($Wc\bar{c}$, $Wb\bar{b}$) durch zusätzliche Jet-Daten
- Methode 2: Berechnung der falschen SVX-Tags durch zusätzliche Jet-Daten. Abschätzung der schwereren Quarkpaar-Produktion durch Monte-Carlo-Simulationen (MC)
- Methode 2 wird bevorzugt durch die Verbesserung des SVX-Tag Algoritmus und des neuen Vertex Detektors.



Anzahl der Ereignisse vor (Kreise) und nach Anwendung des SVX-Tags (Dreiecke). Die karierten Bereiche sind die Anzahl an erwarteten Untergrund SVX-Tags [8].

Unterdrückung des Untergrundes

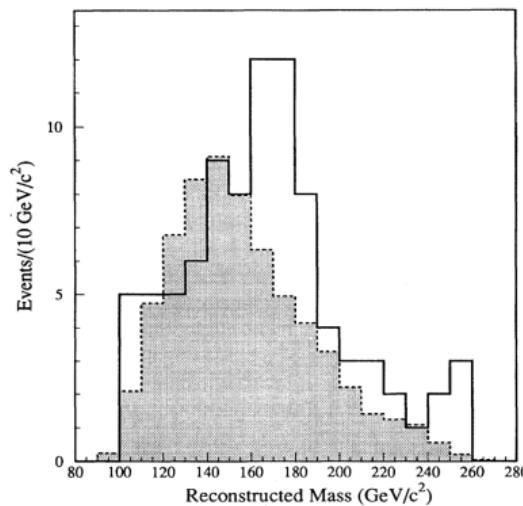
- Untergrundunterdrückung im semileptonischen Kanal durch b -Tagging:
⇒ SVX-Tag (Rekonstruktion des b -Zerfallsvertex)
⇒ SLT-Tag (Identifikation der Leptonen aus semi. b -Zerfall)
- Hauptuntergrund des SLT-Tags sind falsch identifizierte Hadronen und Elektronen aus nicht identifizierten Quellen
- Werden ebenfalls mit den zusätzlichen Jet-Daten abgeschätzt, da Sie im Vergleich zur schwereren Quarkpaar-Produktion gering sind
- Wahrscheinlichkeit das Ergebnisse keine Untergrundfluktuation sind:

Anzahl der Tags oder Ereignisse (Beo.) die beobachtet wurden mit dem erwarteten Hintergrund (EU) und der Wahrscheinlichkeit einer Untergrundfluktuation (FW) [8]

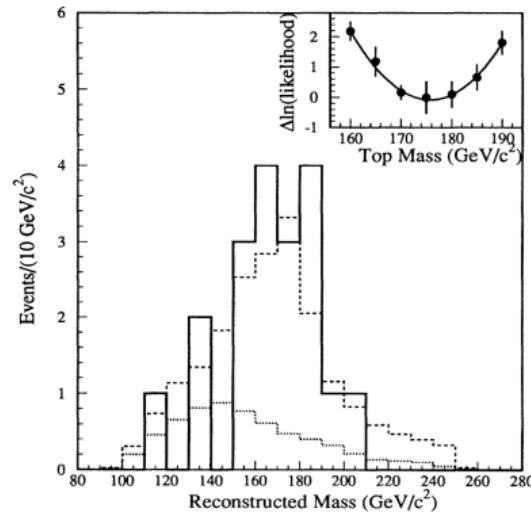
Kanal	SVX	SLT	Dilepton
Beo.	27 Tags	23 Tags	6 Ereignisse
EU	$6,7 \pm 2,1$	$15,4 \pm 2,0$	$1,3 \pm 0,3$
FW	$2 \cdot 10^{-5}$	$6 \cdot 10^{-2}$	$3 \cdot 10^{-3}$

$4,8\sigma$

Effizienz des b -Tags



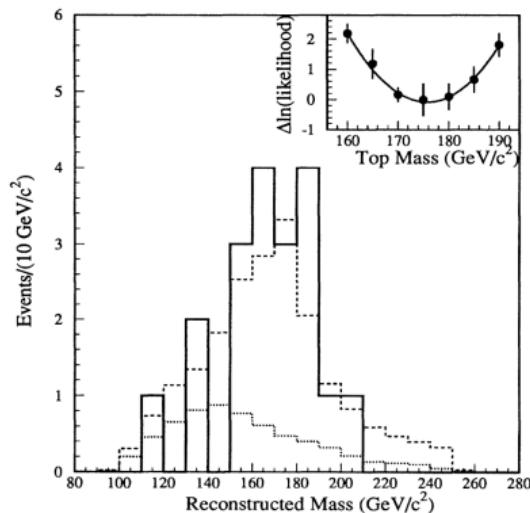
Rekonstruierte Massenverteilung für den Kanal $W+ \geq 4$ Jets ohne b -Tag. Der schattierte Bereich ist die Untergrundvorhersage [8].



Rekonstruierte Massenverteilung für den Kanal $W+ \geq 4$ Jets mit b -Tag. Die durchgezogenen Linien stellen die Daten dar, die gestrichelten die MC-Vorhersage und die gepunkteten den erwarteten Untergrund [8].

Massenrekonstruktion

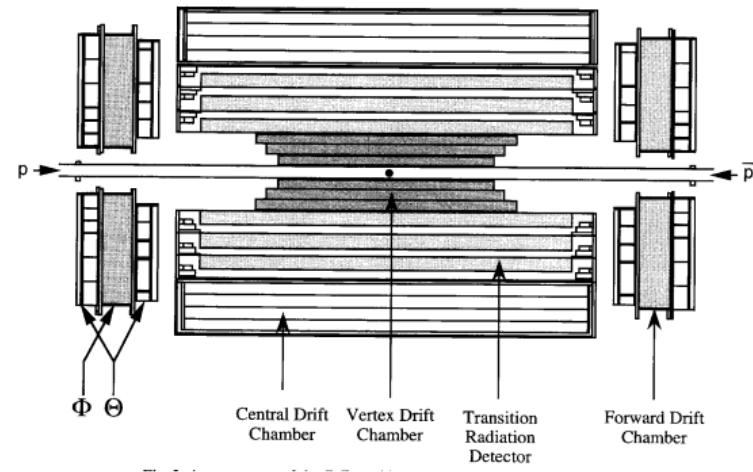
- Massenrekonstruktion mit allen Ereignissen die einen SVX- und SLT-Tag haben
- Zusätzlich ein $-\ln\text{-Likelihood}$ -Fit zur Bestimmung der wahrscheinlichsten Top-Masse
- Wahrscheinlichkeit das die Daten mit dem Untergrund konsistent sind unter Berücksichtigung der Unsicherheiten: $2 \cdot 10^{-2}$ (Kolmogorov-Smirnov-Test)
- Ungenauer Test, da er den engen Massenpeak nicht berücksichtigt
- Ergebnisse: $\Rightarrow m_t = 176 \pm 8(\text{stat}) \pm 10(\text{sys}) \text{ GeV}$
 $\Rightarrow \sigma_{t\bar{t}} = 6,8^{+3,6}_{-2,4} \text{ pb}$



Darstellung der Massenrekonstruktion. Die durchgezogenen Linien stellen die Daten dar, die gestrichelten die MC-Vorhersage und die gepunkteten den erwarteten Untergrund [18].

Das D \emptyset -Experiment

- Vertex Drift Chamber (VTX) zur Rekonstruktion der Spuren
- Transition Radiation Detector (TRD) zur Identifikation von Elektronen zusätzlich zum elektromagnetischen Kalorimeter
- Central Drift Chamber (CDC) zur besseren Auflösung der Driftzeit
- Forward Drift Chamber (FDC) zur Bestimmung der Forward Jet Driftzeiten



Schematische Darstellung des D \emptyset -Experimentes [19].

Event-Selektion

Minimale kinetische Anforderungen an die Ereignisse der Standardselektion (Energien in GeV) [20]

Kanal	Leptons		Jets				
	$E_T(e)$	$p_T(\mu)$	N_{jets}	E_T	E_T^{miss}	H_T	\mathcal{A}
$e\mu + \text{Jets}$	15	12	2	15	20	120	...
$ee + \text{Jets}$	20		2	15	25	120	...
$\mu\mu + \text{Jets}$		15	2	15	...	100	...
$e + \text{Jets}$	20		4	15	25	200	0,05
$\mu + \text{Jets}$		15	4	15	20	200	0,05
$e + \text{Jets}/\mu$	20		3	20	20	140	...
$\mu + \text{Jets}/\mu$		15	3	20	20	140	...

- H_T : Skalarsumme von E_T der Jets (für semileptonischen Kanal und $\mu\mu + \text{Jets}$) / Skalarsumme von E_T der führenden Elektronen und der Jets (für $e\mu + \text{Jets}$ und $ee + \text{Jets}$)
- \mathcal{A} : Transversalkomponente die aus der Ereignisebene heraus zeigt
- $\mu + \text{Jets}/\mu$: Semileptonischer Zerfall mit zusätzlichem Myon aus b -Zerfall (" b -Tag")
- "Leichtere Selektion": Ohne H_T und mit $\mathcal{A} > 0,03$

Bestimmung und Abschätzung des Untergrundes

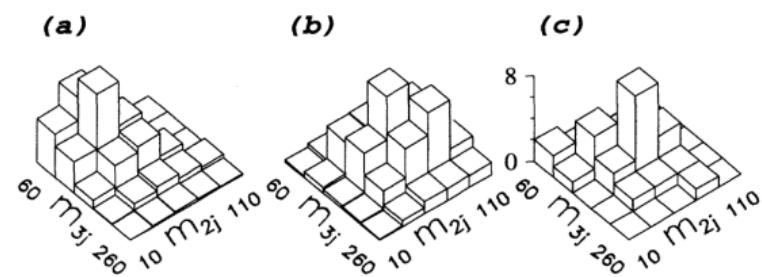
- Mögliche Untergrundprozesse:
 $\Rightarrow Z \rightarrow ee, \tau\tau, b\bar{b}, c\bar{c}$
 $\Rightarrow b\bar{b}, c\bar{c}, WW, WZ, W + \text{Jets}, Z + \text{Jets}$ durch starke Prozesse \Rightarrow Falsch identifizierte Leptonen
- MC-Vorhersage zeigt: $Z \rightarrow \tau\tau$ und WW -Produktion dominant
 \Rightarrow Abschätzung durch MC
- Abschätzung von $W + \text{Jets}$ und Multijet-Produktion durch Daten
- H_T guter Diskriminator zwischen Signal und Untergrund

Bestätigung eines massereichen Teilchens

Anzahl der erwarteten Ereignisse pro Kanal für verschiedene Massenhypothesen, Anzahl der erwartete Untergrundereignisse pro Kanal und die Anzahl der gemessenen Ereignisse pro Kanal. Die Wahrscheinlichkeit einer Untergrundfluktuation auf summiert 17 Ereignisse liegt bei $2 \cdot 10^{-6}$ was zu $4,6\sigma$ korrespondiert [21]

m_t	$e\mu + \text{Jets}$	$ee + \text{Jets}$	$\mu\mu + \text{Jets}$	$e + \text{Jets}$	$\mu + \text{Jets}$	$e + \text{Jets}/\mu$	$\mu + \text{Jets}/\mu$	Summiert
140	$1,36 \pm 0,21$	$1,04 \pm 0,19$	$0,46 \pm 0,08$	$4,05 \pm 0,94$	$2,47 \pm 0,68$	$2,93 \pm 0,68$	$1,48 \pm 0,42$	$13,80 \pm 2,07$
160	$0,94 \pm 0,13$	$0,69 \pm 0,12$	$0,34 \pm 0,07$	$3,13 \pm 0,54$	$2,04 \pm 0,53$	$1,95 \pm 0,39$	$0,92 \pm 0,24$	$10,01 \pm 1,41$
180	$0,57 \pm 0,07$	$0,40 \pm 0,07$	$0,19 \pm 0,04$	$2,42 \pm 0,67$	$1,41 \pm 0,36$	$1,14 \pm 0,22$	$0,64 \pm 0,16$	$6,77 \pm 1,09$
200	$0,34 \pm 0,04$	$0,25 \pm 0,05$	$0,11 \pm 0,02$	$1,84 \pm 0,31$	$0,95 \pm 0,24$	$0,81 \pm 0,16$	$0,41 \pm 0,10$	$4,71 \pm 0,66$
BG	$0,12 \pm 0,03$	$0,28 \pm 0,14$	$0,25 \pm 0,04$	$1,22 \pm 0,42$	$0,71 \pm 0,28$	$0,85 \pm 0,14$	$0,36 \pm 0,08$	$3,70 \pm 0,55$
Da	2	0	1	5	3	3	3	17

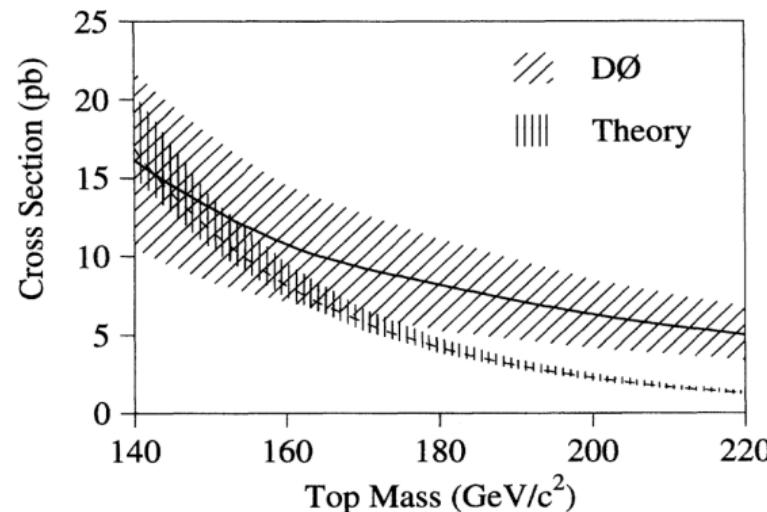
- Kanal: $t\bar{t} \rightarrow W^+W^-b\bar{b} \rightarrow l\nu q\bar{q}b\bar{b}$
- 1 Jet → Semileptonischer Zerfall des Top
3 Jets → Hadronischer Zerfall des Top
- m_{3j} : Invariante Masse der 3 Jets aus dem hadronischen Zerfall
- m_{2j} : Kleinstmögliche invariante Masse aus 2 der 3 Jets
- Peak bei höherer invariante Masse als Untergrundvorhersage
- Confidence Level zwischen den Hypothesen:
 ⇒ Top-Quark + Untergrund: 60 % C.L.
 ⇒ Nur Untergrund: 3 % C.L.



Darstellung der Kalorimetereinträge für Einzellepton + Jets. Die z -Achse gibt die Anzahl der Ereignisse an. (a): Untergrund, (b): MC-Vorhersage mit $m_t = 200$ GeV, (c): Daten [21].

Messung des Wirkungsquerschnitts

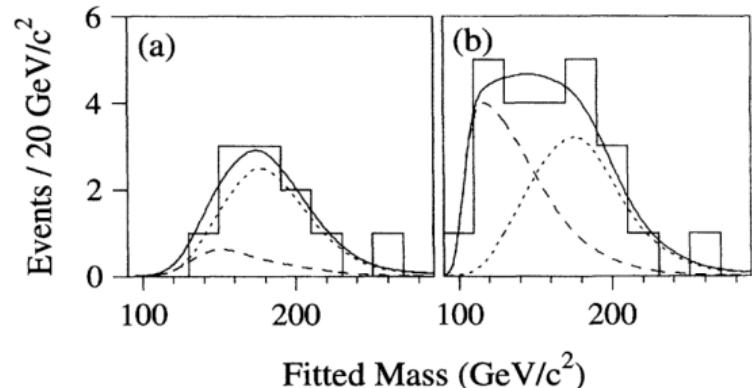
- Annahme von DØ: $m_t = 200 \text{ GeV}$
 $\Rightarrow \sigma_{t\bar{t}} = (6,3 \pm 2,2) \text{ pb}$
- Großer Fehler von $\sigma_{t\bar{t}}$ stammt aus 12% Unsicherheit auf der Luminosität.
- Wirkungsquerschnitt stimmt mit Daten aus "leichterer" Selektion überein



Der Wirkungsquerschnitt aufgetragen gegen die Top-Masse.
Die durchgezogenen Linien stellen die Werte dar mit einem 1σ Fehlerband [21].

Ergebnisse

- Massenrekonstruktion mittels des Kanals:
 $t\bar{t} \rightarrow W^+W^- b\bar{b} \rightarrow l\nu q\bar{q}\bar{b}$
- Für jedes Ereignis wird eine χ^2 -wahrscheinlichkeitsgewichtete mittlere Masse berechnet und mit einem gebinnten Likelihood-Fit gefittet.
 $\Rightarrow m_t = 199^{+31}_{-25}(\text{stat}) \text{ GeV}$
- Zur Verbesserung der Statistik: Weiterer Fit der Masse mit anschließendem gebinnten Likelihood-Fit auf eine "leichtere" Selektion
 $\Rightarrow m_t = 199^{+19}_{-21}(\text{stat}) \text{ GeV}$
- Daten stimmen gut überein mit CDF
- Ergebnisse:
 $\Rightarrow m_t = (199^{+19}_{-21}(\text{stat}) \pm 22(\text{sys})) \text{ GeV}$
 $\Rightarrow \sigma_{t\bar{t}} = (6,4 \pm 2,2) \text{ pb}$



Darstellung der gefitteten Masse für die Standardselektion und eine "leichtere" Selektion. Die durchgezogenen Linien stellen die Daten dar, die gepunktete die MC-Vorhersage und die gestrichelte den erwarteten Untergrund [20].

Zeitliche Einordnung

Theoretische Grundlagen

Motivation

Indirekte Messung

Analyse

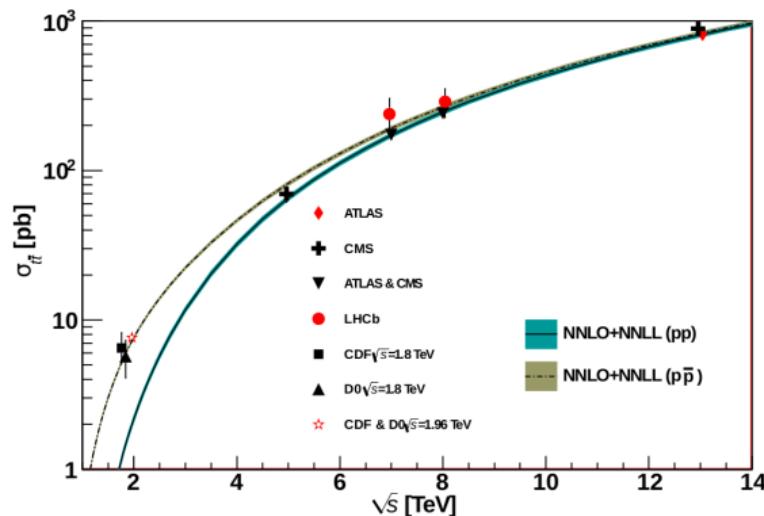
Heutige Messungen

Ausblick

Referenzen

$t\bar{t}$ -Wirkungsquerschnitt

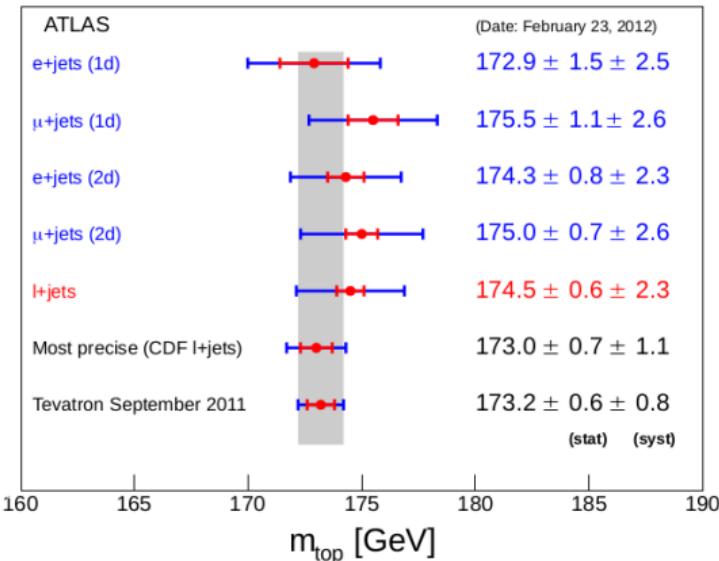
- Wirkungsquerschnitt verschiedener Experimente
- Daten stimmen mit der NNLO+NNLL-Vorhersage sehr gut überein
- Neuste Messung von ATLAS und CMS bei $\sqrt{s} = 13 \text{ TeV}$



Gemessener und vorhergesagter
Produktionswirkungsquerschnitt für $t\bar{t}$ -Produktion. Die
Vorhersage wurde mit $m_t = 172,5 \text{ GeV}$ erstellt [16].

Massenbestimmung im Kanal $t\bar{t}$

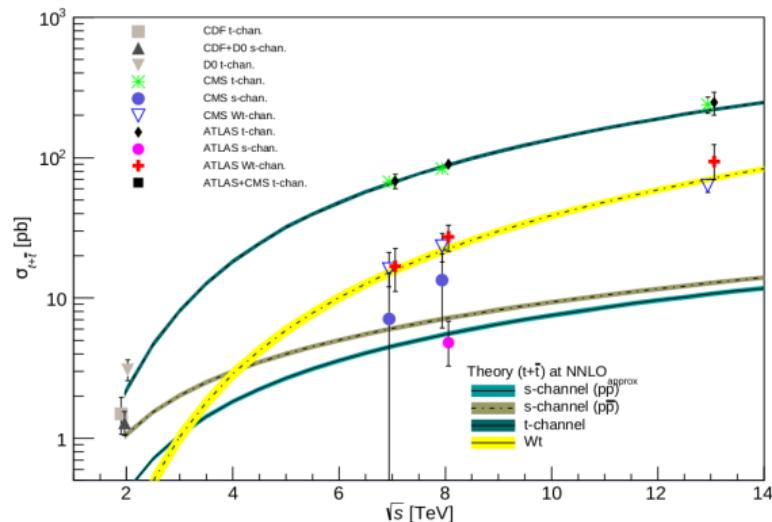
- Verschiedene neue Analysemethoden bei ATLAS zur genauen Bestimmung der Top-Quark Masse
- Jedoch: Im Vergleich zur Messung vom Tevatron von 2011 immernoch größere Unsicherheiten
- ATLAS Analyse in den Kanälen $t\bar{t} \rightarrow \text{Lepton} + \text{Jets}$
- Massenbestimmung noch in anderen Kanälen möglich
 $\Rightarrow t\bar{t} \rightarrow \text{Lepton} + \text{Jets}$ beste Messung aufgrund der guten ECAL Auflösung des ATLAS



Gemessene und theoretische Werte von m_t von verschiedenen Experimenten und verschiedener Analysemethoden [22].

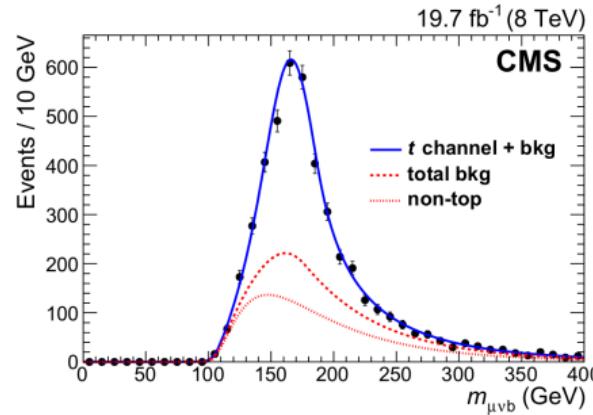
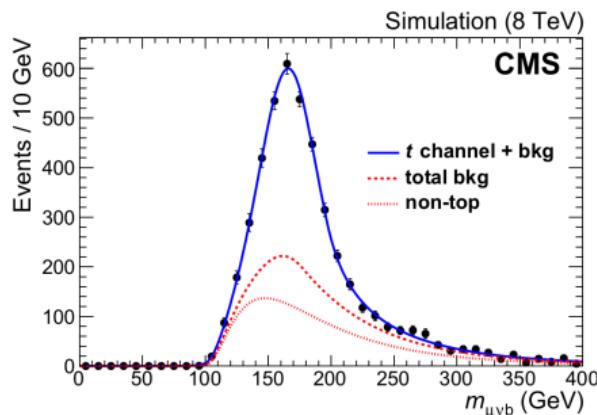
Einzel-Top Wirkungsquerschnitt

- Verschiedene Experimente mit verschiedenen Wirkungsquerschnitten in verschiedenen Kanälen
- Ergebnisse der Messungen stimmen mit Theorievorhersagen auf NNLO-Ebene überein
- Neuste Messungen stammen von ATLAS und CMS bei $\sqrt{s} = 13 \text{ TeV}$



Gemessener und vorhergesagter
Produktionswirkungsquerschnitt für einzeln produzierte
Top-Quarks [16].

Einzel-Top Massenbestimmung



Simulierte und gemessene Verteilung der invarianten Masse von $\mu\nu b$. [23].

- Messung im Kanal $t \rightarrow Wb \rightarrow \mu\nu b$
- Ergebnis der Messung:
 $m_t = 172,95 \pm 0,77(\text{stat})^{0,97}_{-0,93}(\text{syst})$
- \bar{t} Ereignisse werden zum fitten genutzt, jedoch nicht in der Bestimmung von m_t

Zeitliche Einordnung

Theoretische Grundlagen

Motivation

Indirekte Messung

Analyse

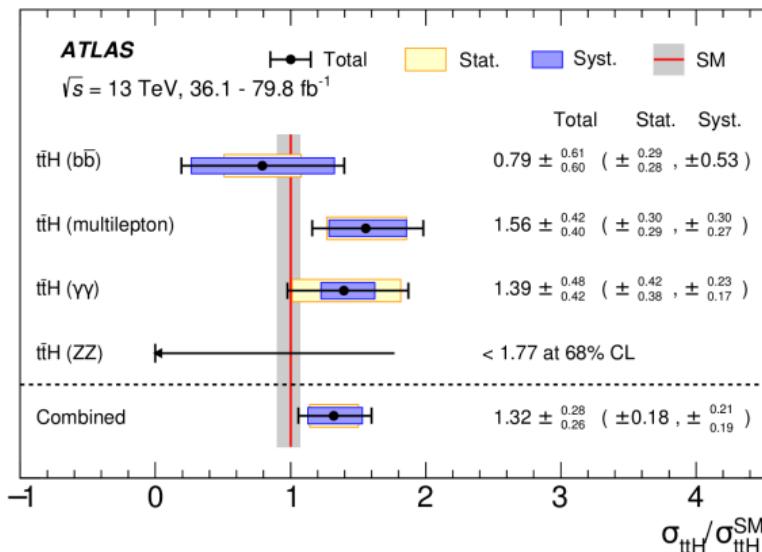
Heutige Messungen

Ausblick

Referenzen

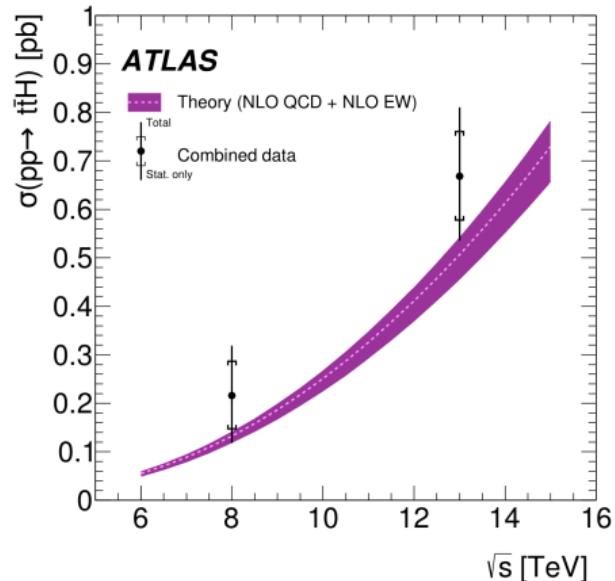
$t\bar{t}H$ -Produktion

- Wirkungsquerschnitte haben große Fehler
 \Rightarrow Fehlende Statistik
- $\gamma\gamma$ - und ZZ - Analyse mit $79,8 \text{ fb}^{-1}$ bei $\sqrt{s} = 13 \text{ TeV}$
- $b\bar{b}$ - und Multijet-Analyse mit $36,1 \text{ fb}^{-1}$ bei $\sqrt{s} = 13 \text{ TeV}$
- Unsicherheit des Theoriewertes durch PDF und α_S Unsicherheiten und durch Korrekturen höherer Ordnung
- Beobachtete (erwartete) Signifikanz: $6,3\sigma$ ($5,1\sigma$)



Darstellung der Wirkungsquerschnitte in verschiedenen Kanälen für $t\bar{t}H$ im Vergleich zur Vorhersage des Standardmodells [24].

- Hinweis auf neue Physik?
- Prozess noch nicht richtig verstanden?
- Monte-Carlo Simulationen nicht richtig?



Darstellung des Wirkungsquerschnittes von $pp \rightarrow t\bar{t}H$ gegen die Schwerpunktsenergie bei $\sqrt{s} = 8, 13$ TeV [24].

Referenzen I

-  Makoto Kobayashi und Toshihide Maskawa,
CP Violation in the Renormalizable Theory of Weak Interaction, Prog. Theor. Phys. **49** (1973) S. 652.
-  S. L. Glashow, J. Iliopoulos und L. Maiani, *Weak Interactions with Lepton-Hadron Symmetry*,
Phys. Rev. **D2** (1970) S. 1285.
-  S. W. Herb u.a., *Observation of a Dimuon Resonance at 9.5-GeV in 400-GeV Proton-Nucleus Collisions*,
Phys. Rev. Lett. **39** (1977) S. 252.
-  H. J. Behrend u.a.,
Search for New Heavy Quarks in e^+e^- Collisions Up to 46.78-GeV Center-of-mass Energy,
Phys. Lett. **144B** (1984) S. 297.
-  K. Abe u.a., *Measurement of R and Search for New Quark Flavors Decaying Into Multi - Jet Final States in e^+e^- Collisions Between 54-GeV and 61.4-GeV c.m. Energies*, Phys. Lett. **B234** (1990) S. 382.
-  M. Z. Akrawy u.a., *A Search for the Top and b' Quarks in Hadronic Z^0 Decays*,
Phys. Lett. **B236** (1990) S. 364.

Referenzen II

-  T. Akesson u. a., *Search for Top Quark Production at the CERN $\bar{p}p$ Collider*, Z. Phys. **C46** (1990) S. 179.
-  F. Abe u. a., *Observation of top quark production in $\bar{p}p$ collisions*, Phys. Rev. Lett. **74** (1995) S. 2626, arXiv: [hep-ex/9503002 \[hep-ex\]](#).
-  S. Abachi u. a., *Search for high mass top quark production in $p\bar{p}$ collisions at $\sqrt{s} = 1.8 \text{ TeV}$* , Phys. Rev. Lett. **74** (1995) S. 2422, arXiv: [hep-ex/9411001 \[hep-ex\]](#).
-  Vardan Khachatryan u. a.,
Measurement of the top quark mass using proton-proton data at $\sqrt{(s)} = 7$ and 8 TeV , Phys. Rev. **D93** (2016) S. 072004, arXiv: [1509.04044 \[hep-ex\]](#).
-  Arnulf Quadt, *Top quark physics at hadron colliders*, Eur. Phys. J. **C48** (2006) S. 835.
-  Wikimedia Commons, *Ttbar decay channels*, File:Ttbar decay channels.png, 2016,
URL: https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Ttbar_decay_channels.png.
-  Wikimedia Commons, *Ttbar production via gg fusion*, File:Ttbar production via gg fusion.png, 2016,
URL: https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Ttbar_production_via_gg_fusion.png.

Referenzen III

-  Wikimedia Commons, *Ttbar production (t channel)*, [File:Ttbar production \(t channel\).png](#), 2016,
URL: [https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Ttbar_production_\(t_channel\).png](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Ttbar_production_(t_channel).png).
-  Wikimedia Commons, *Ttbar production via qqbar annihilation*,
[File:Ttbar production via qqbar annihilation.png](#), 2016, URL:
https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Ttbar_production_via_qqbar_annihilation.png
-  C. Patrignani u.a., *Review of Particle Physics*, Chin. Phys. **C40** (2016) S. 100001.
-  Chris Quigg, *Unanswered Questions in the Electroweak Theory*,
Ann. Rev. Nucl. Part. Sci. **59** (2009) S. 505, arXiv: [0905.3187 \[hep-ph\]](https://arxiv.org/abs/0905.3187).
-  Angela Barbaro Galtieri, Fabrizio Margaroli und Igor Volobouev,
Precision measurements of the top quark mass from the Tevatron in the pre-LHC era,
Rept. Prog. Phys. **75** (2012) S. 056201, arXiv: [1109.2163 \[hep-ex\]](https://arxiv.org/abs/1109.2163).
-  S. Abachi u.a., *The D0 Detector*, Nucl. Instrum. Meth. **A338** (1994) S. 185.

Referenzen IV

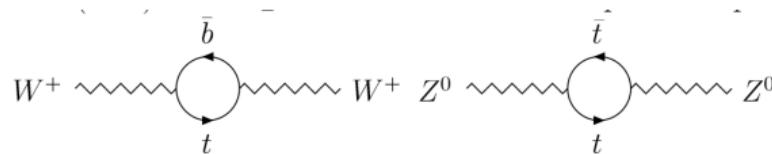
-  S. Abachi u. a., *Observation of the top quark*, Phys. Rev. Lett. **74** (1995) S. 2632, arXiv: [hep-ex/9503003 \[hep-ex\]](#).
-  S. Abachi u. a., *Search for the top quark in $p\bar{p}$ collisions at $\sqrt{s} = 1.8$ TeV*, Phys. Rev. Lett. **72** (1994) S. 2138.
-  The ATLAS Collaboration, *Measurement of the top quark mass with the template method in the $t\bar{t} \rightarrow \text{lepton} + \text{jets}$ channel using ATLAS data*, Eur. Phys. J. **C 77** (2017) S. 172.
-  Albert M Sirunyan u. a., *Measurement of the top quark mass using single top quark events in proton-proton collisions at $\sqrt{s} = 8$ TeV*, Eur. Phys. J. **C77** (2017) S. 354, arXiv: [1703.02530 \[hep-ex\]](#).
-  M. Aaboud u. a., *Observation of Higgs boson production in association with a top quark pair at the LHC with the ATLAS detector*, Phys. Lett. **B784** (2018) S. 173, arXiv: [1806.00425 \[hep-ex\]](#).

W- und Z Loop-Korrekturen

- Loop-Korrekturen verbinden W - und Z -Masse:

$$M_W^2 = M_Z^2 \left(1 - \sin^2(\theta_W) (1 + \Delta\rho) \right)$$

$$\Delta\rho \approx \Delta\rho^{(\text{Quarks})} = \frac{3G_F m_t^2}{8\pi^2 \sqrt{2}}$$



Darstellung der zwei Loop-Korrekturen für W - und Z -Bosonen [17].