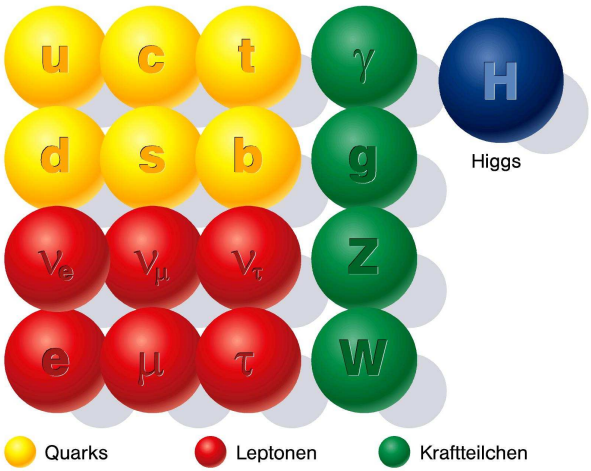
Das Top Quark und andere Fenster für neue Physik

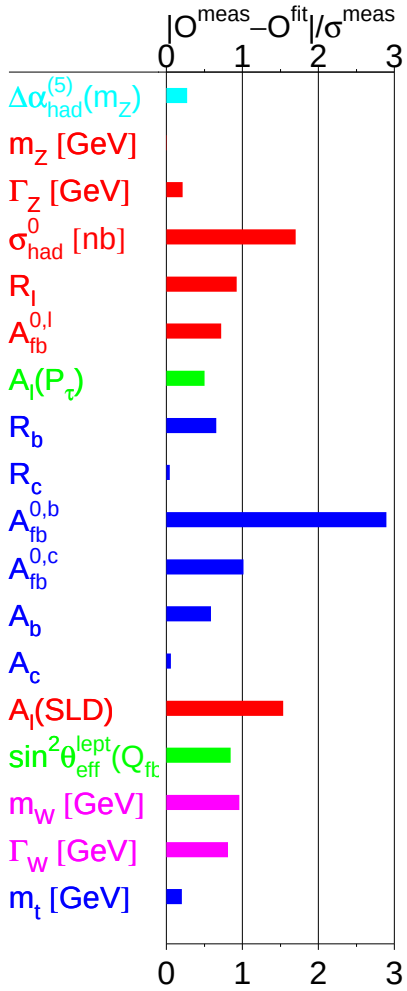
Daniel Wicke
(Bergische Universität Wuppertal)

Einleitung

Das Standard Modell

Beschreibung mit nur 12 Fermionen (Materieteilchen),
Eichbosonen von 3 Wechselwirkungen und einem Skalar.





Mehr als 30 Jahre experimentelle Prüfung
mit großer Präzision liefert gute Konsistenz

Pulls

Offene Fragen/Probleme des Standard Modell

Elementarteilchenphysik

- Wie läßt sich die Gravitation einbinden?
- Warum ist das Higgs so leicht? (Hierarchieproblem)
- Warum ist die elektrische Ladung quantisiert?

...

Kosmologie

- Warum gibt es im Universum einen Überschuß an Baryonen?
- Woraus besteht die dunkle Materie?
- Was ist dunkle Energie?

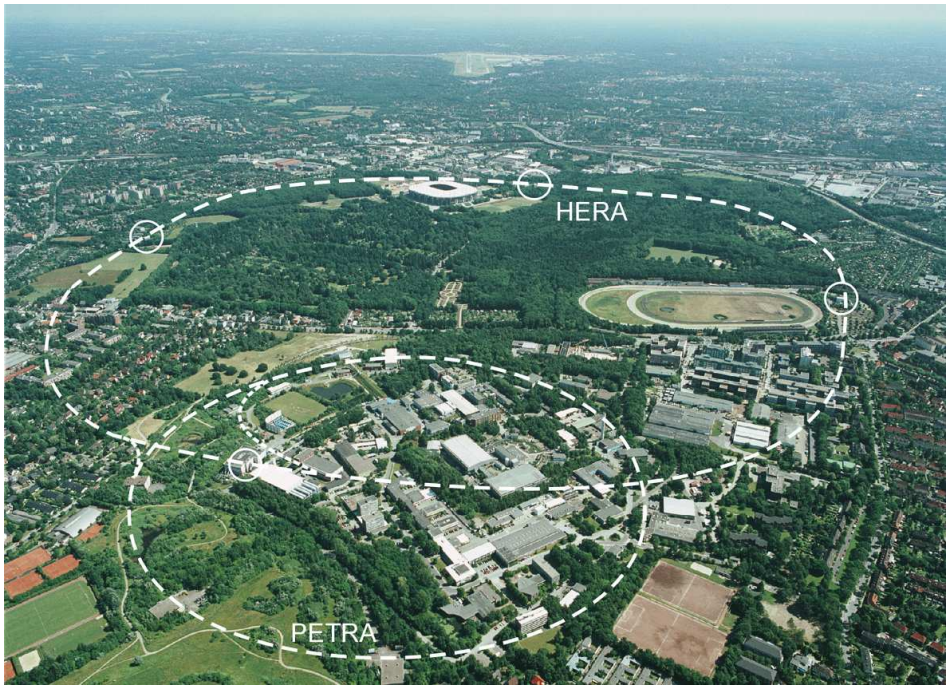
...

Wo wird nach neuen Phänomenen gesucht?

Bei seltenen Prozessen, bei höchsten Energien und Massen.

Gegenwärtige Beschleuniger an der Hochenergiegrenze

HERA: $e^{\pm}p \quad \sqrt{s} = 319\,\text{GeV}$



Laufzeit: -2007
Luminosität: $\sim 500\,\text{pb}^{-1}$

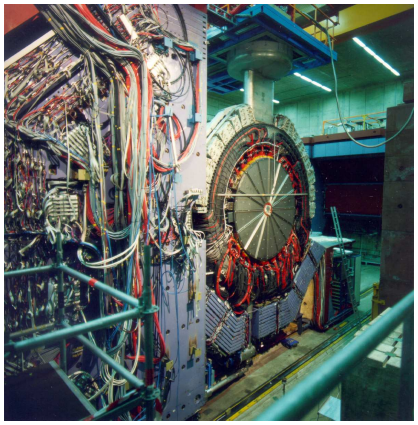
Tevatron: $p\bar{p} \quad \sqrt{s} = 1{,}96\,\text{TeV}$

Laufzeit: $-2009(10?)$
Luminosität: $\sim 3\,\text{fb}^{-1}$

Zukunft LHC: ATLAS, ALICE, CMS, LHCb

Detektoren

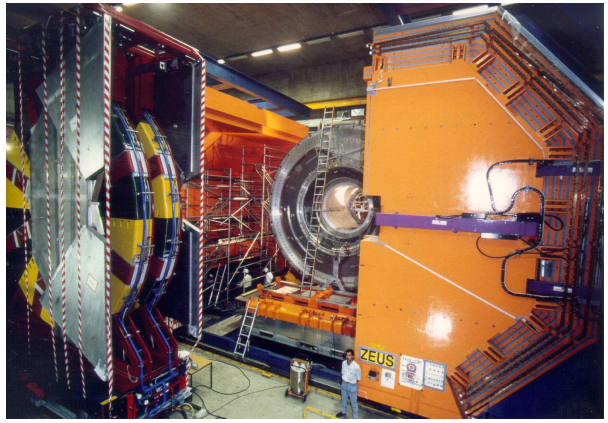
Daten der Beschleuniger werden von jeweils zwei Experimenten ausgewertet:

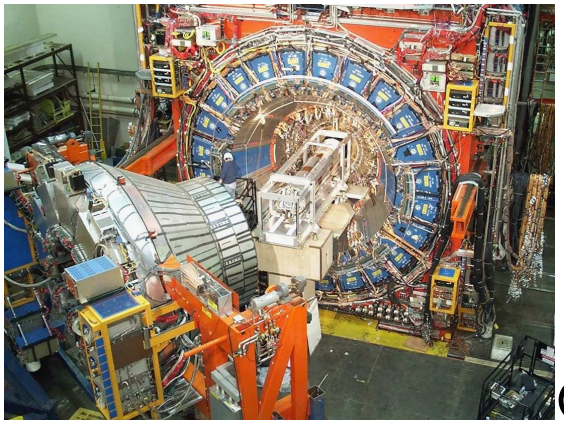


H1

HERA

Zeus

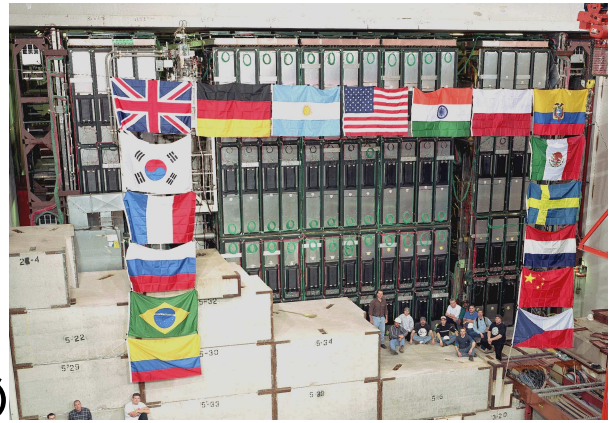




CDF

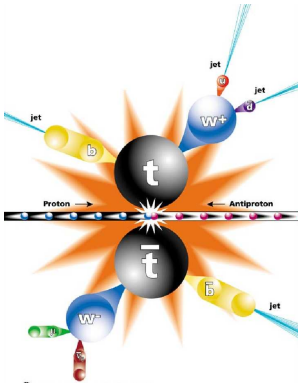
Tevatron

DØ

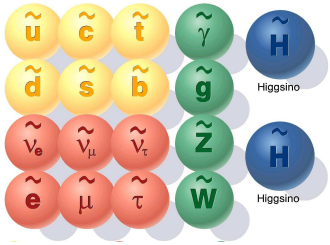


Übersicht

- Top Quark
  - Masse
  - Produktion
  - Zerfall



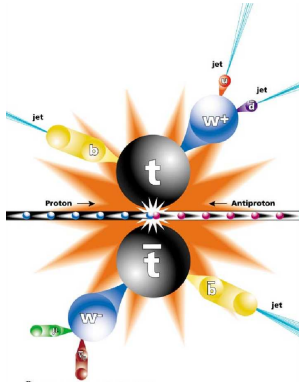
- Weitere Fenster
  - Supersymmetrie
  - Spezielle Signaturen
  - Generische Suchen



- Zusammenfassung

Top Physik

- Top Quark
  - Masse
  - Produktion
  - Zerfall



Ist das Top Quark ein Fenster zu neuer Physik?

Ja, ist es, denn es ist ...

- sehr schwer. Seine Masse ist erstaunlich nah an der elektroschwachen Skala.
- das einzige nackte Quark (d.h. es zerfällt bevor es hadronisiert)
- das letzte der vorhergesagten Quarks.

Nein, ist es nicht! Es hat ...

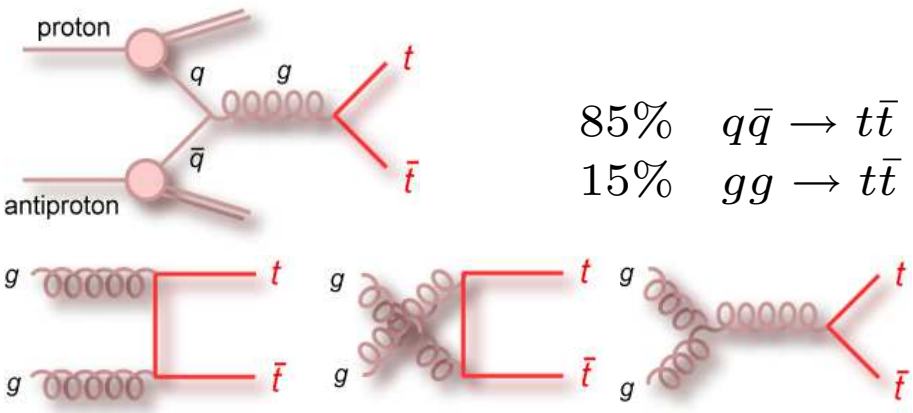
- die gleiche elektrische Ladung wie u and c-quarks.
- die gleiche schwache Kopplung wie andere Quarks.
- die gleiche Farbladung wie andere Quarks. *Wirklich??*

Vielleicht ...

- hat es andere Kopplungen
- ist es nicht das letzte Quark $\Rightarrow$ Neue Physik

Top Quark Produktion am Tevatron

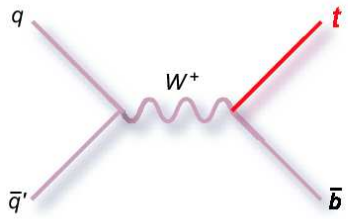
Starke Top Produktion



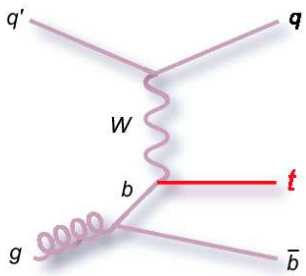
$$85\% \quad q\bar{q} \to t\bar{t}$$
$$15\% \quad gg \to t\bar{t}$$

- $\sigma(t\bar{t}) = 6.77 \pm 0.42\,\text{pb}$

Schwache Top Produktion



Drell-Yan
s-Kanal



W-g Fusion
t-Kanal

- $\sigma(t) = 2.9 \pm 0.3\,\text{pb}$

Pro integrierter Luminosität von $1\,\text{fb}^{-1}$
werden etwa 7000 Toppaare und 3000 Einzeltop Ereignisse erwartet.

Zerfall des Top Quarks

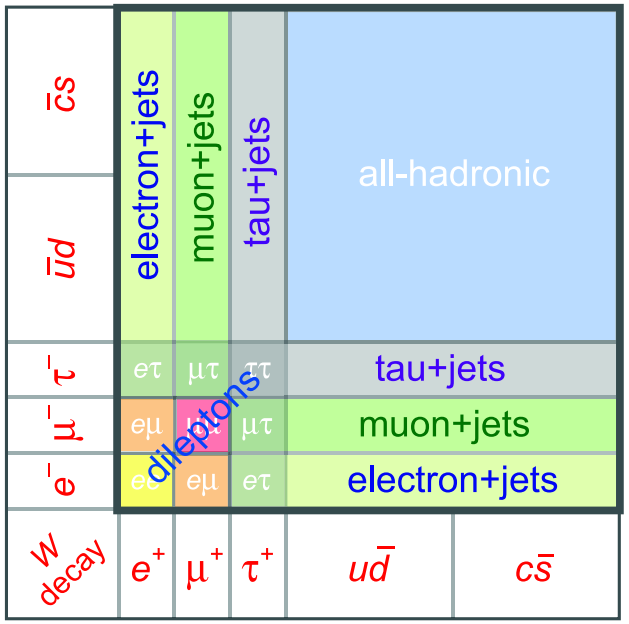
Top Quarks zerfallen (fast) ausschließlich in bW.

Signaturen der Paarproduktion

Zerfallsmoden nach den W-Zerfällen benannt:

- Dilepton $(2b + 2l + 2\nu)$
- Lepton+Jets $(2b + 2q + l\nu)$
- Alljets $(2b + 4q)$

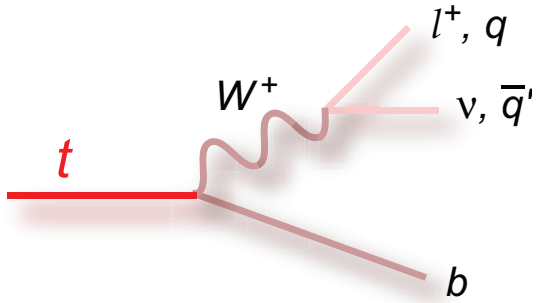
Top Pair Decay Channels



Single Top Signaturen

Definiert durch Produktionskanal,
nur leptonischer W-Zerfall:

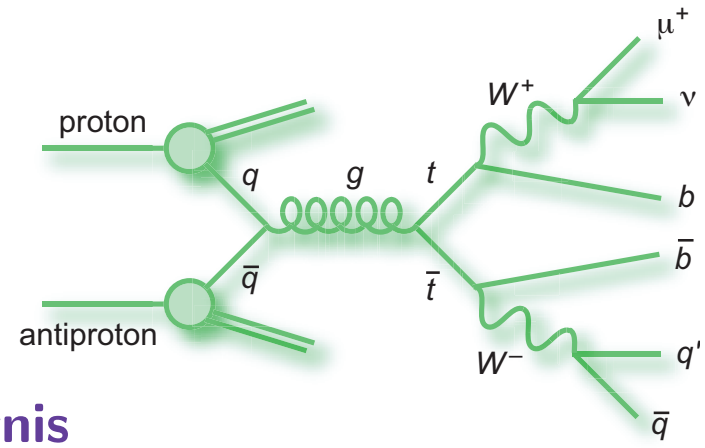
- s-Kanal $(2b + l + \nu)$
- t-Kanal $(b + j + l + \nu)$



Messung der Top Masse

Template Methode (CDF)

- Kombination von l+jets und Dilepton
- Erklärung konzentriert sich auf l+jets



Bestimmung der Topmasse für jedes Ereignis

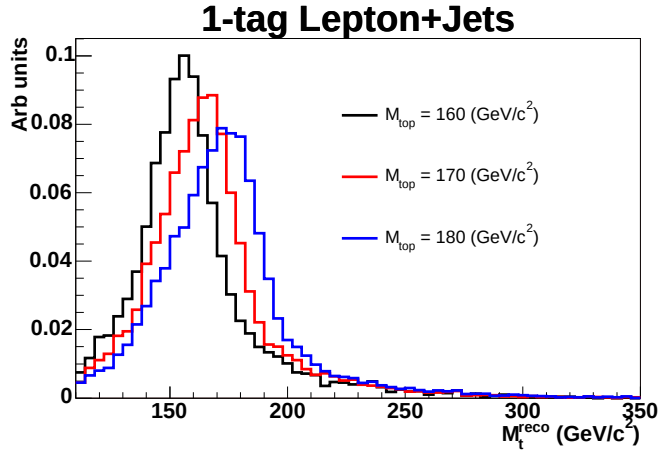
Rekonstruktion der Viererimpulse der t-Quarks in jedem einzelnen Ereignis

- Rekonstruktion des ν Impulses
- (Korrekte) Assoziation von $l\nu$ und 4 Jets zu 2 Top-Quarks
- Aus Summe der assoziierten Viererimpulse: $m^2_{t,\mathrm{rec}} = E^2 - \vec{p}^2$

In realitas mit Fit: Gleiche Topmassen und m_W nominal als Nebenbedingungen.
Präzise Impulsmessung & richtige Zuordnung entscheidend:
min. χ^2 Lösung verwendet.

Template Methode (CDF) II

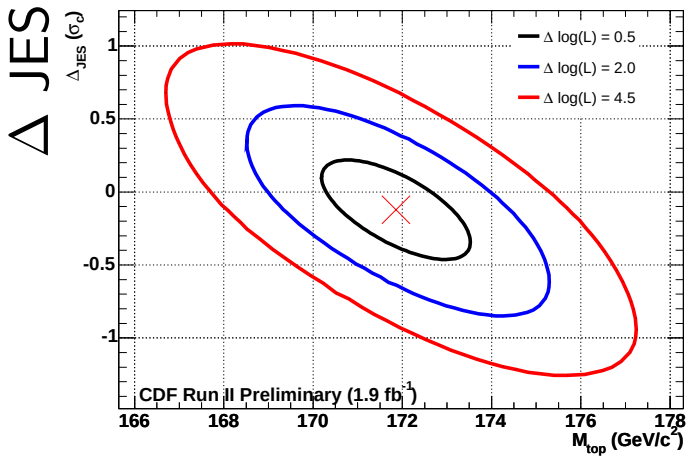
- Vergleiche rekonstruierte Massen & andere Obs. mit Simulation (Templates)
  - für verschiedene m_t
  - mit erwartetem Untergrundanteil
- Wähle m_t mit bester Übereinstimmung



m_t

Einschränkung der Energieskala

- Templates für m_W rekonstruiert aus m_{jj}. bei verschiedenen Energieskalen (JES).
- Selbstkalibration der Energieskala.



m_t

Topmasse und JES aus 2d-Fit an **MC** ($1.9\,\mathrm{fb}^{-1}$):

$$m_t = 171.9 \pm 1.7(\mathrm{stat} + \mathrm{JES}) \pm 1.0(\mathrm{syst})\ \mathrm{GeV}$$

Matrix Element Methode (DØ)

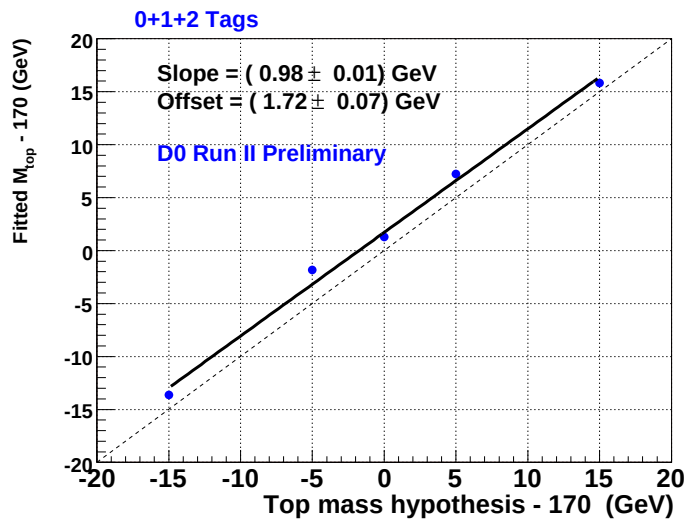
Bestimmung der Topmasse aus Likelihood

Wahrscheinlichkeit für kinematische Konfiguration x abhängig von m_t und JES:

$$P_{\mathrm{evt}}(x; m_t) = f_{\mathrm{top}} P_{\mathrm{sgn}}(x; m_t) + (1 - f_{\mathrm{top}}) P_{\mathrm{bkg}}(x)$$

$$P_{\mathrm{sgn}}(x; m_t) = \frac{1}{\sigma_{t\bar{t}}(m_t)} \int \mathrm{d}q_1\, \mathrm{d}q_2\, \underbrace{\mathrm{d}^n\sigma(q\bar{q} \to t\bar{t} \to y; m_t)}_{\text{Matrix Element}}\, \underbrace{f(q_1) f(q_2)}_{\text{PDFs}}\, \underbrace{W(y, x; \mathrm{JES})}_{\text{Auflösung}}$$

- Maximierung der Likelihood liefert m_t und Energieskala (JES).
- Kalibration durch Vergleich mit **MC**



Topmasse nach Kalibration ($0.9\,\mathrm{fb}^{-1}$):

$$m_t = 170.5 \pm 2.4(\mathrm{stat} + \mathrm{JES}) \pm 1.2(\mathrm{syst})\ \mathrm{GeV}$$

Kombination der direkten Messungen der Topmasse

Kombination der RunI und RunII Ergebnisse beider Experimente:
Best Linear Unbiased Estimator (BLUE), d.h. berücksichtigt Korrelationen.

Systematische Unsicherheiten

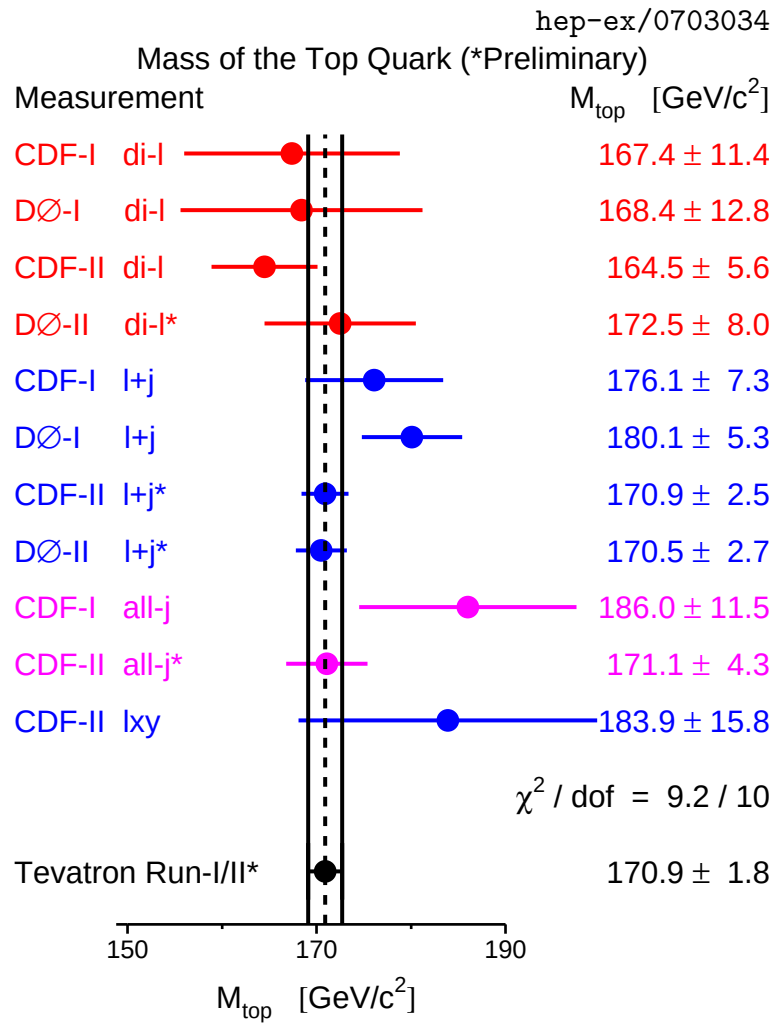
- Jet Energie Skala (leichte Quarks)
  weiterhin dominierend
- Jet Energie Skala in b-jets
- Signal, Untergrund, . . .

Aktueller Weltmittelwert (3.2007)

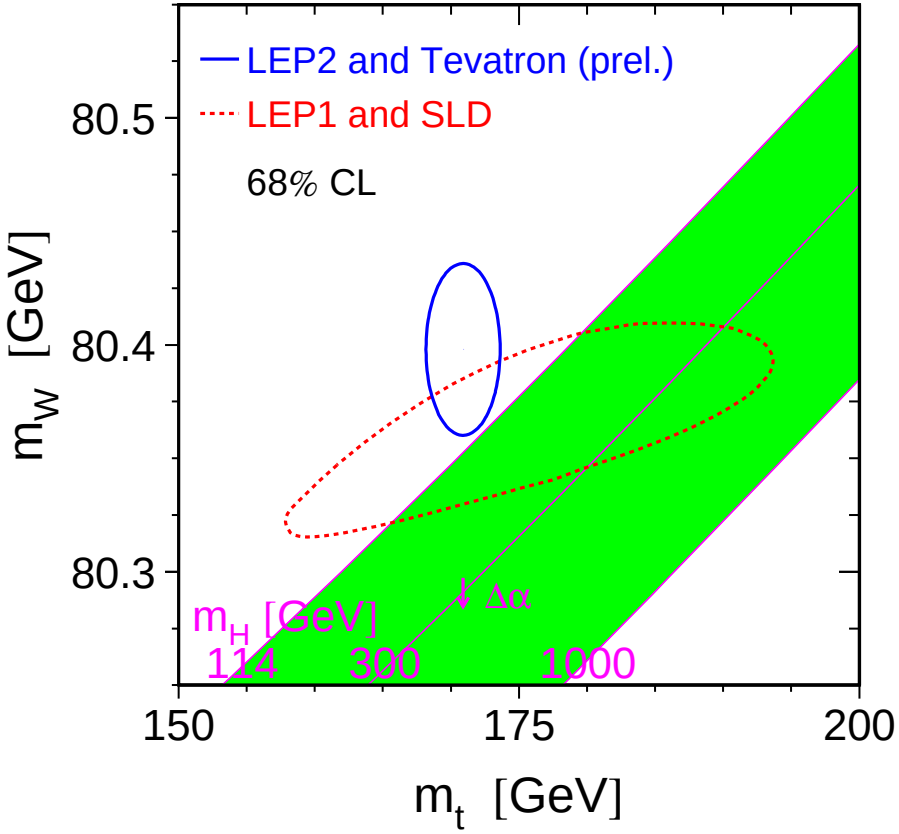
$$170.9 \pm 1.1(\text{stat}) \pm 1.5(\text{syst})\ \text{GeV}$$

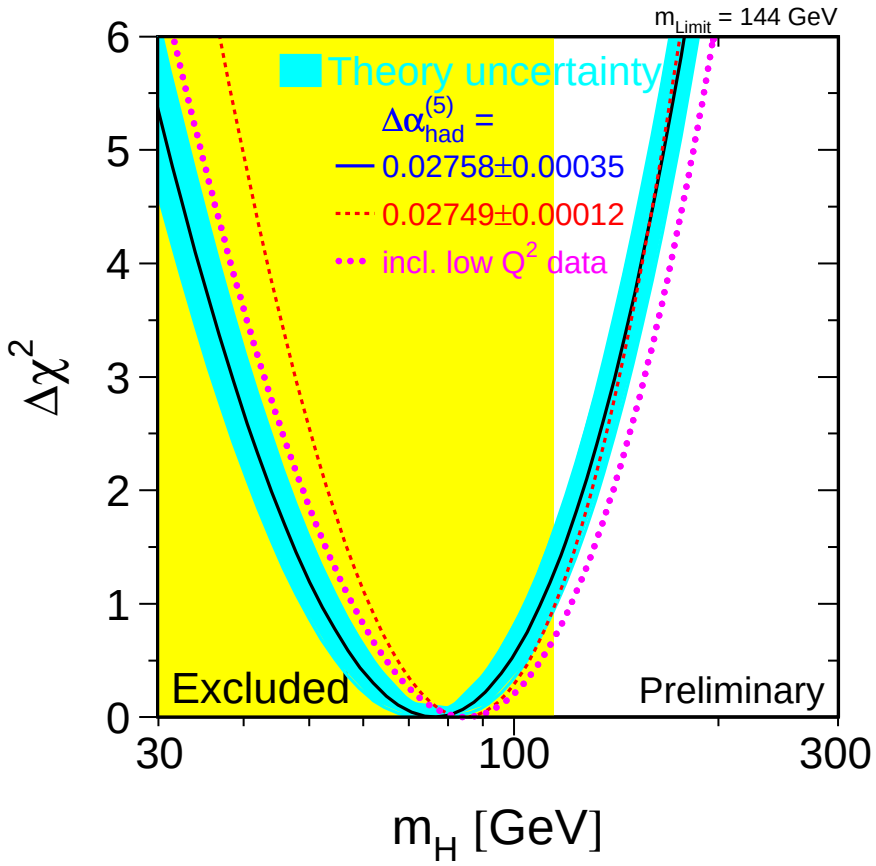
Totale Unsicherheit: 1.8 GeV

Dilepton	163.5 ± 4.5 GeV
l+jets	171.1 ± 1.9 GeV
Alljets	172.2 ± 4.1 GeV



Die Top Masse in elektroschwachen Fits





Kombinierte m_W und m_t Resultate berühren SM-Bereich nur knapp

Higgsmassen Projektion

$M_H \leq 182\,\text{GeV}$ (95%CL)

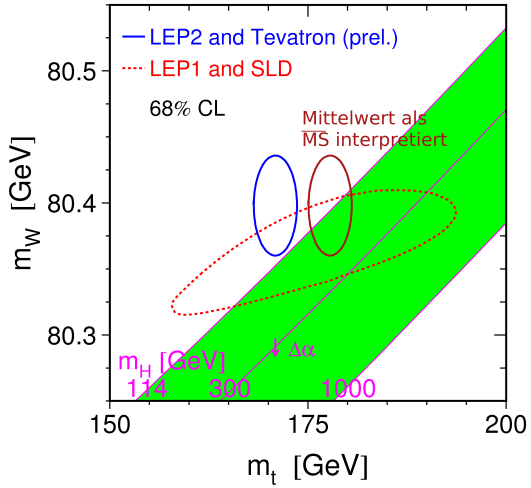
(inkl. untere Grenze)

Offene Fragen der Top Massenmessung

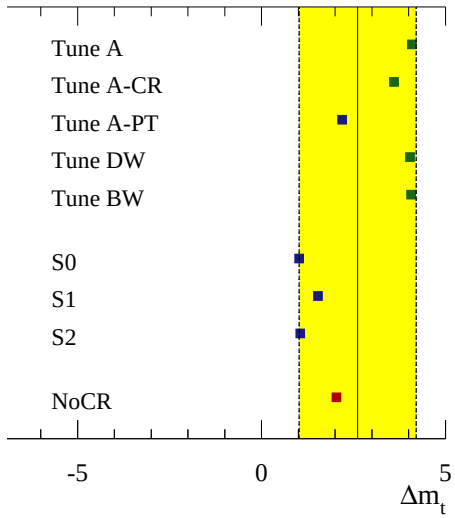
Verstehen wir eigentlich was wir da messen?
Polmasse, $\overline{\mathrm{MS}}$-Masse, ...?

- Messsungen sind an MC angepasst
  oder mit MC kalibriert.
- Wir messen also den Pythia Parameter `PARP(6,1)`
- Aktuelle Interpretation: das ist die Polmasse.
- Unsicherheiten wg. Abstrahlung weicher Gluonen.
- Wie genau ist Annahme? $1,\ \ 2,\ \ 5$ GeV??

Alternative Methoden zur Massenbestimmung wichtig.

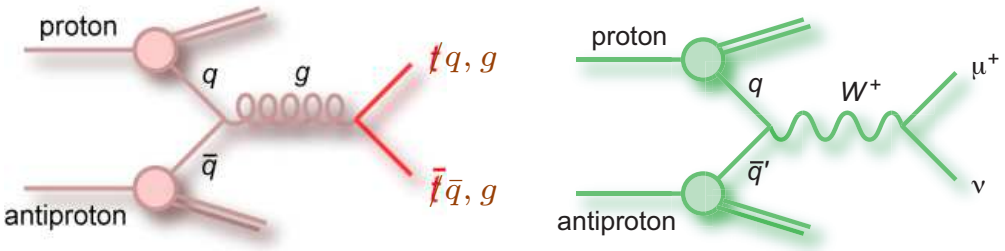


Skands, DW, EPJ C52 (2007)



Starke Produktion, Toppaare

$$\sigma_{t\bar{t}} = \frac{N - B}{\varepsilon \mathcal{L} \cdot \mathrm{BR}}$$

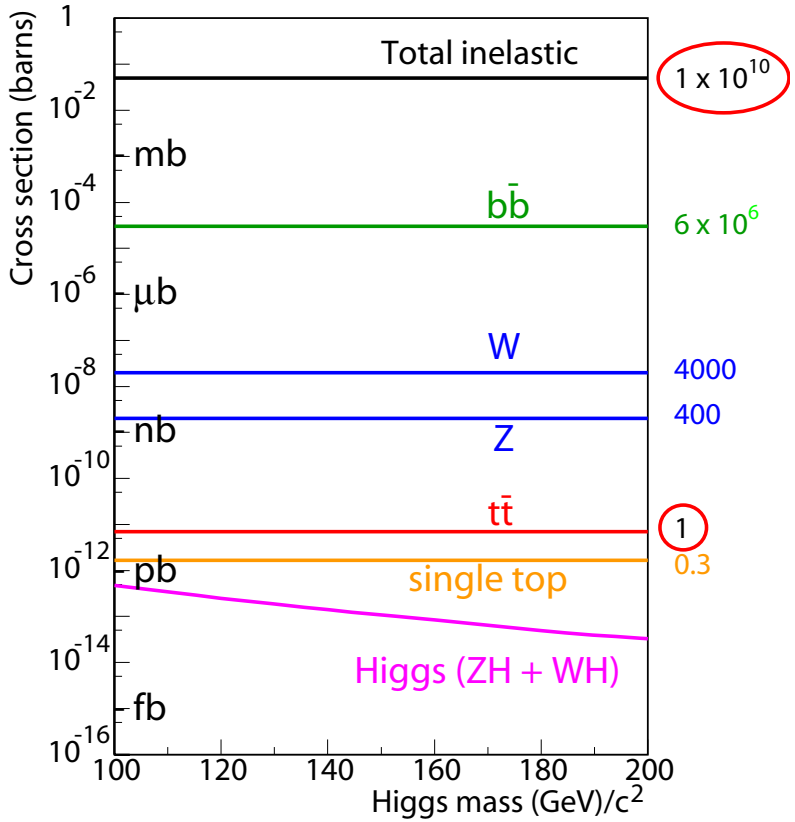


Dominante Untergründe

- Multi-Jet Ereignisse
  ($q\bar{q}$ or gg + Gluon Abstrahlung)
- W+Jets
- Z+Jets

Simulation von Multi-Jet Ereignissen schwierig bzw. ungenau.

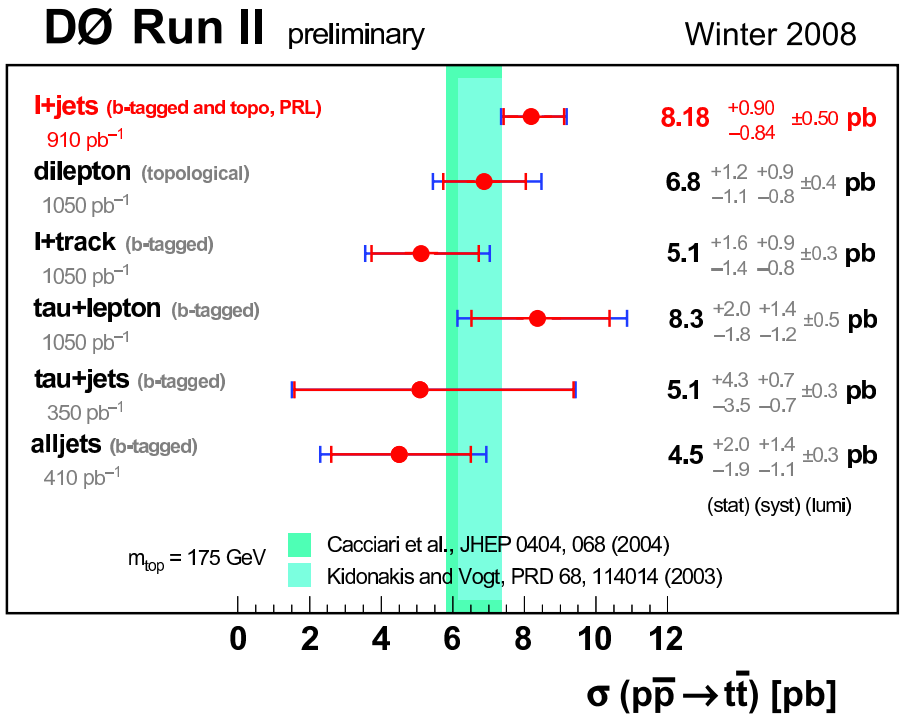
Untergrundabschätzung aus Daten

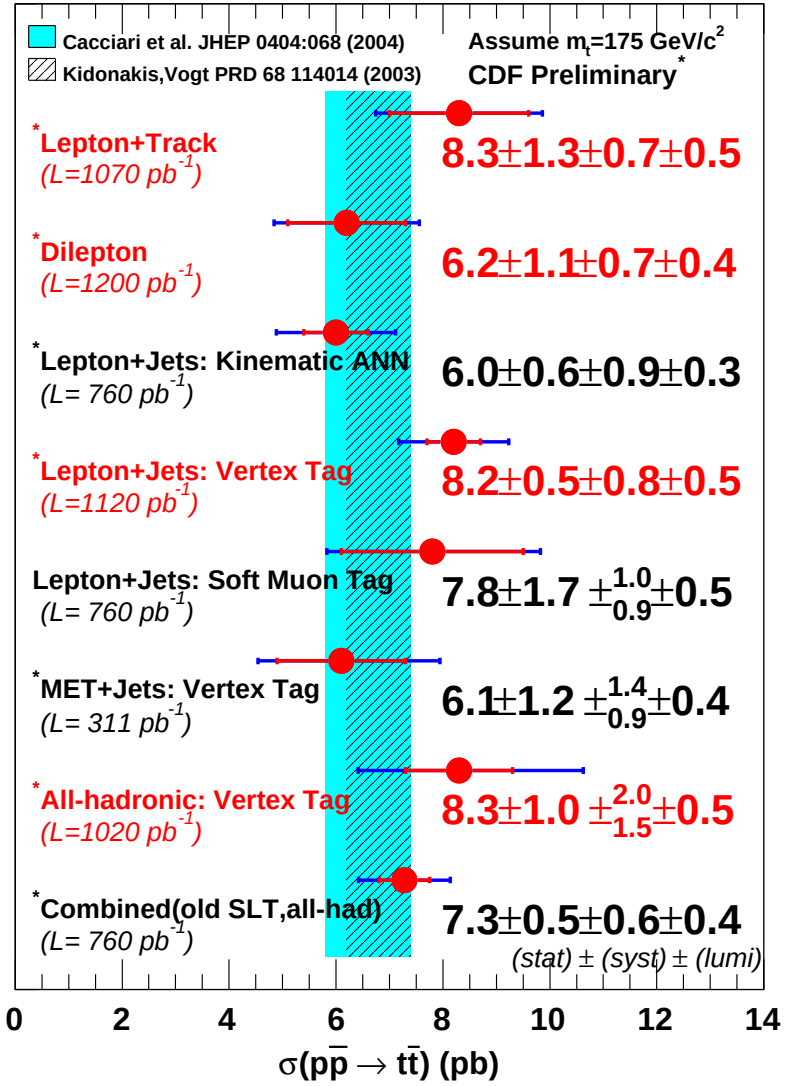


Resultate zum $t\bar{t}$ Wirkungsquerschnitt

- Verschiedenen Kanäle & Methoden
- Gute Übereinstimmung untereinander und mit Theorie: $\sigma_{t\bar{t}} = 6.77 \pm 0.42$pb

für $m_t = 175$ GeV





Top Masse aus dem Wirkungsquerschnitt

$\sigma_{t\bar{t}}$ ist Top Massen abhängig.

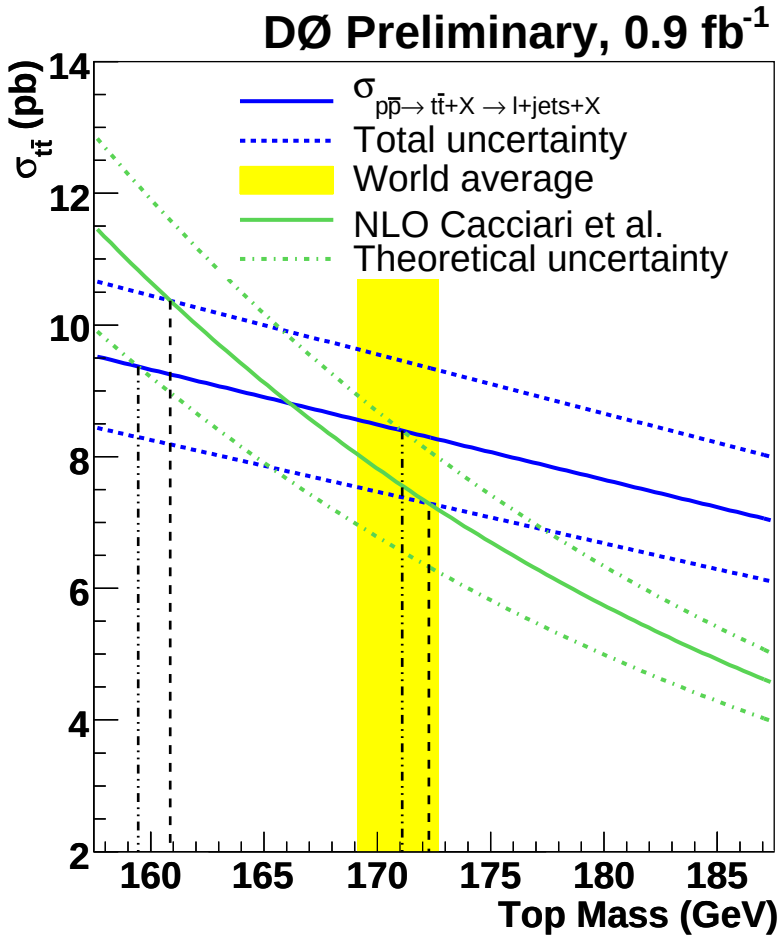
Sowohl der theoretisch vorhergesagte als auch die experimentelle Messung.

DØ (z.B.: Cacciari et al.)

l+jets: $m_t = 166.1^{+6.1}_{-5.3}(\text{exp})^{+4.9}_{-6.7}(\text{theo})$ GeV

Dilepton $m_t = 174.1^{+9.8}_{-8.4}(\text{exp})^{+4.2}_{-6.0}(\text{theo})$ GeV

m_t *ist hier die Polmasse!*



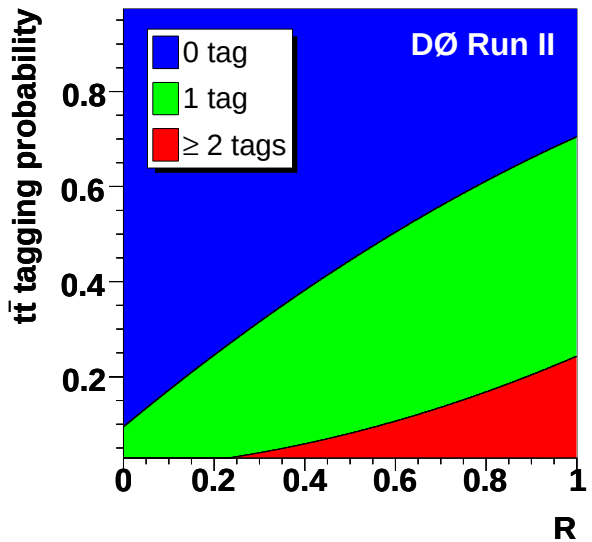
Verträglich mit direkten Messungen; größere Unsicherheiten

Verzweigungsverhältnis (und Wirkungsquerschnitt)

Aus Verhältnis der Ereignisse mit 0,1,2 identifizierten b-jets, simultan

$$R = \frac{B(t \to Wb)}{B(t \to Wq)} = \frac{|V_{tb}|^2}{|V_{tb}|^2 + |V_{ts}|^2 + |V_{td}|^2} = 0.97 \pm 0.09$$

$$\sigma_{t\bar{t}} = 8.18^{+0.90}_{-0.84(\mathrm{stat+syst})} \pm 0.50_{(\mathrm{lumi})}\,\mathrm{pb}$$



DØ, $L = 0.9\,\mathrm{fb}^{-1}$

Einschränkungen an die CKM Matrix

Bei Annahme von 3 Generationen:

$\sqrt{R} = |V_{tb}| > 0.88$ at 95% C.L. (SM: 0.9991)

Aktuell beste experimentelle Grenze

Bei beliebiger Anzahl von Generationen:

$$\frac{|V_{tb}|^2}{|V_{ts}|^2 + |V_{td}|^2} > 3.76 \text{ at } 95\% \text{ C.L.}$$

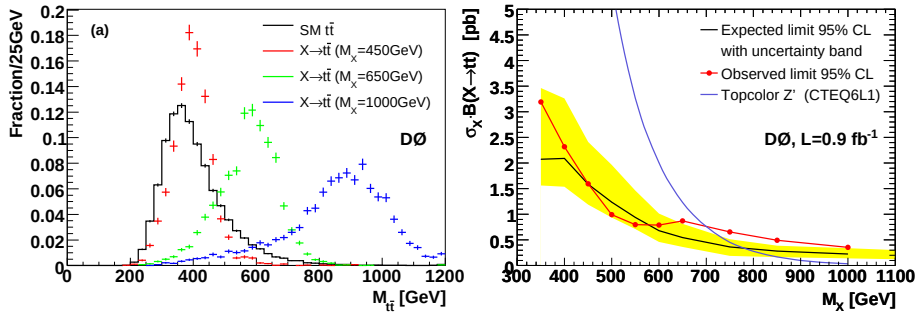
Keine Abweichung vom SM

Resonante Top Paarproduktion

Im SM keine resonante $t\bar{t}$ Produktion

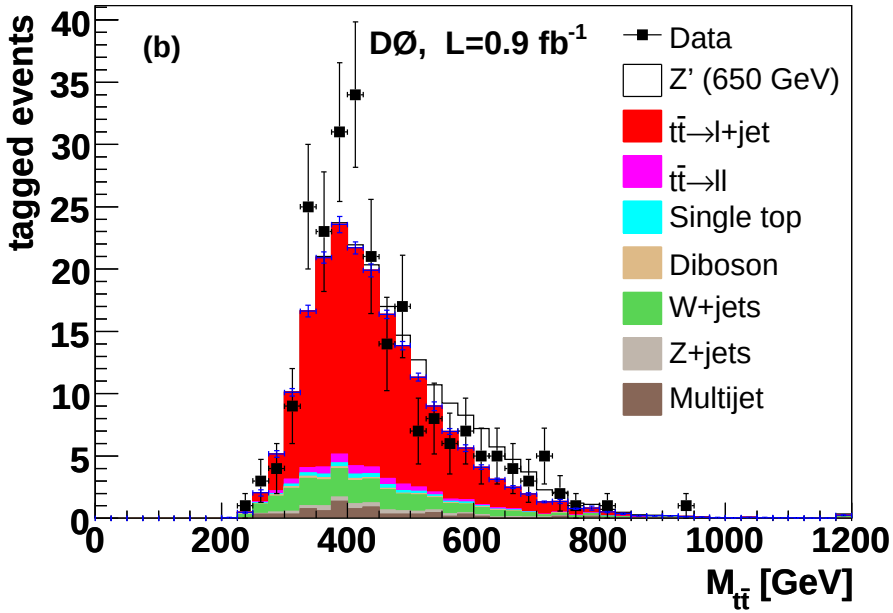
Erweiterungen enthalten schwere Resonanzen mit Zerfall in $t\bar{t}$

Sichtbar in invarianter Masse $\frac{\mathrm{d}\sigma}{\mathrm{d}m_{t\bar{t}}}$



Suche nach schmalen Resonanzen

Keine signifikanten Abweichungen.



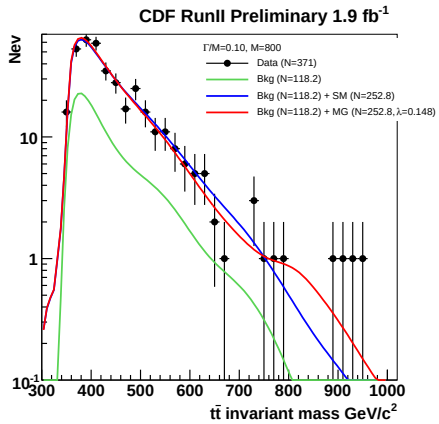
Z.B. Topcolor-assisted Technicolor:

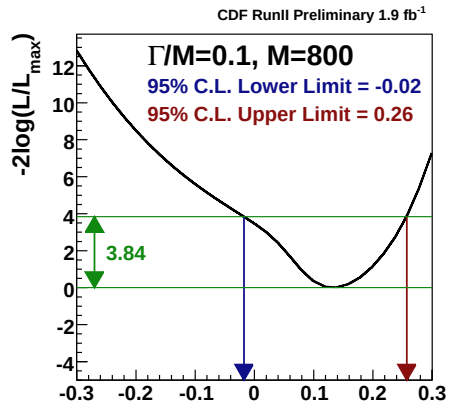
CDF: $M_{Z'} > 720\,\mathrm{GeV}$ (erwartet 710 GeV)
DØ: $M_{Z'} > 700\,\mathrm{GeV}$ (erwartet 780 GeV)

(beide $L = 0.9\,\mathrm{fb}^{-1}$)

Resonante Produktion durch massives Gluon

CDF: $1.9\,\mathrm{fb}^{-1}$
Für verschiedene hyp. Gluonmassen Kopplung als Bruchteil der starken Kopplung bestimmt.

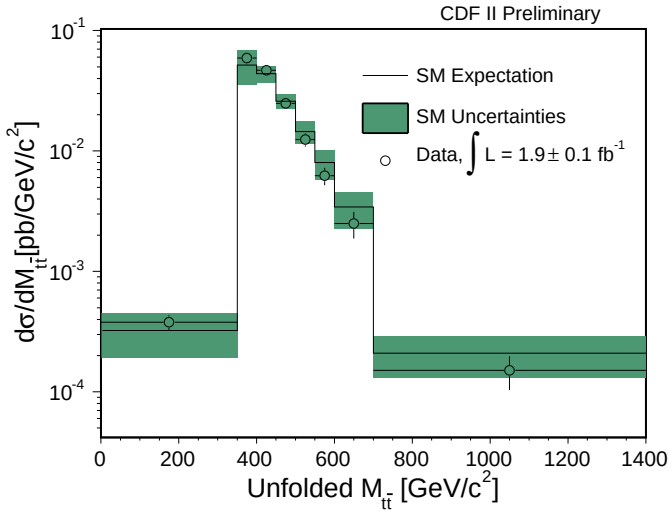




Differenzieller Wirkungsquerschnitt

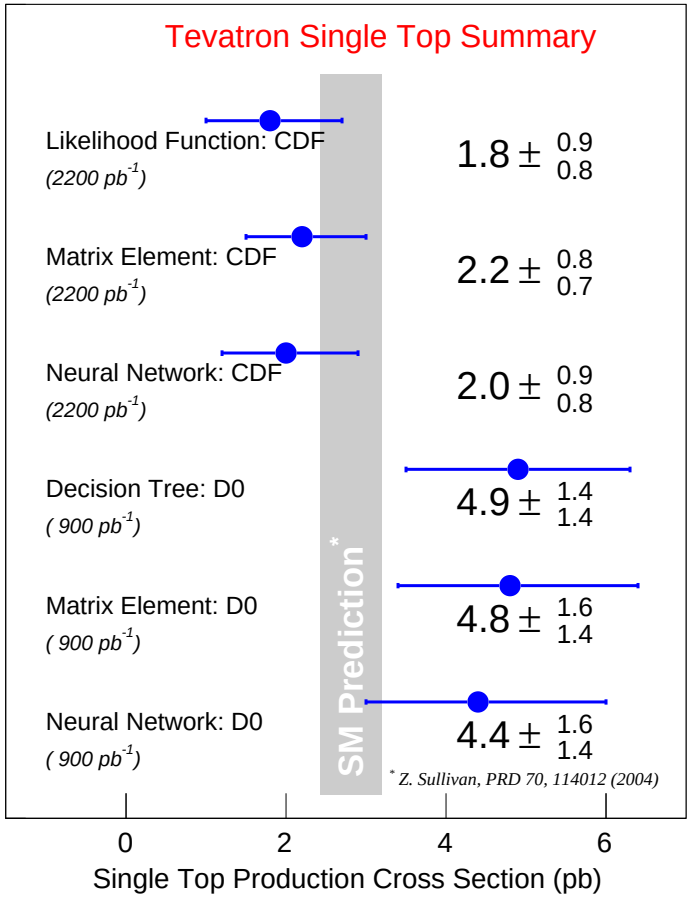
CDF: $1.9\,\mathrm{fb}^{-1}$
Entfaltung erlaubt Messung des differenziellen Wirkungsquerschnitts

Übereinstimmung mit SM: 45%

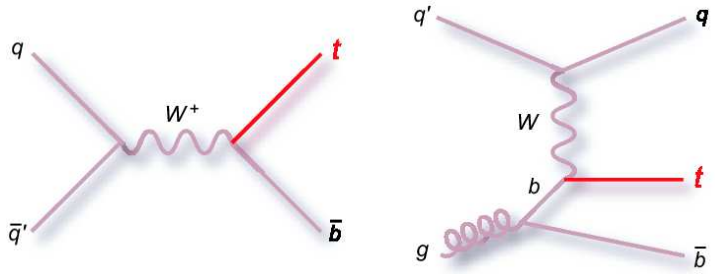


Elektroschwache Produktion, Einzelne Tops

Wirkungsquerschnitt



SM Vorhersage: $\sigma_{s+t} = 2.9$pb



Experimentell sehr schwierig
Großer Untergrund aus W+jets
Mehrere Multivariate Analysen pro Exp.

Signifikanz

Überschuß über 0-t-Hypothese

DØ	3.6σ	$(0.9\,\text{fb}^{-1})$
CDF	$3 - 3.5\sigma$	$(1.5\,\text{fb}^{-1})$

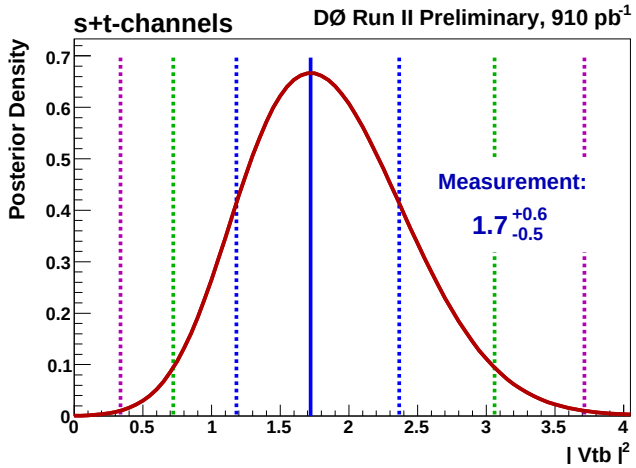
Hinweis jetzt in beiden Experimenten

Interpretation als V_{tb}

Bei Annahme der SM Kopplung ergibt sich V_{tb}:

CDF: $|V_{tb}| = 0.88^{+0.14}_{-0.12} \pm 0.07$

DØ: $|V_{tb}| = 1.3 \pm 0.2$

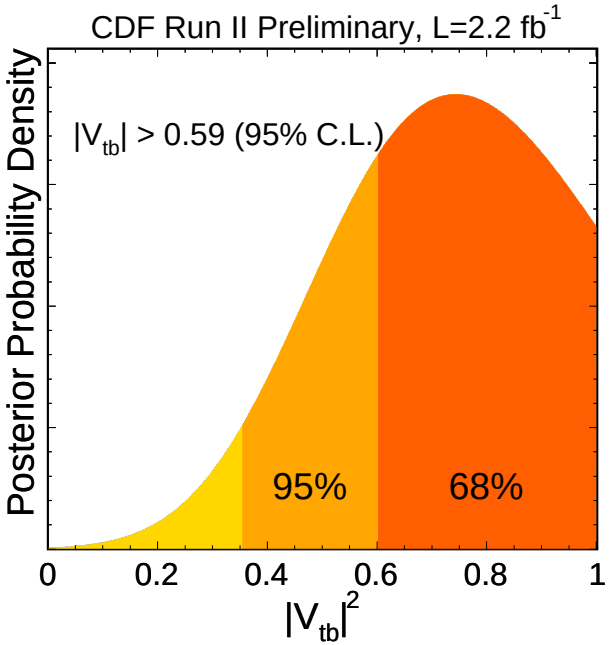


Unter Einschränkung auf den erlaubten Bereich

CDF: $|V_{tb}| > 0.59$

DØ: $|V_{tb}| > 0.68$

ohne Annahmen über die Anzahl der Generationen



Erinnerung:
aus Toppaarproduktion *für drei Generationen*
$|V_{tb}| > 0.88$

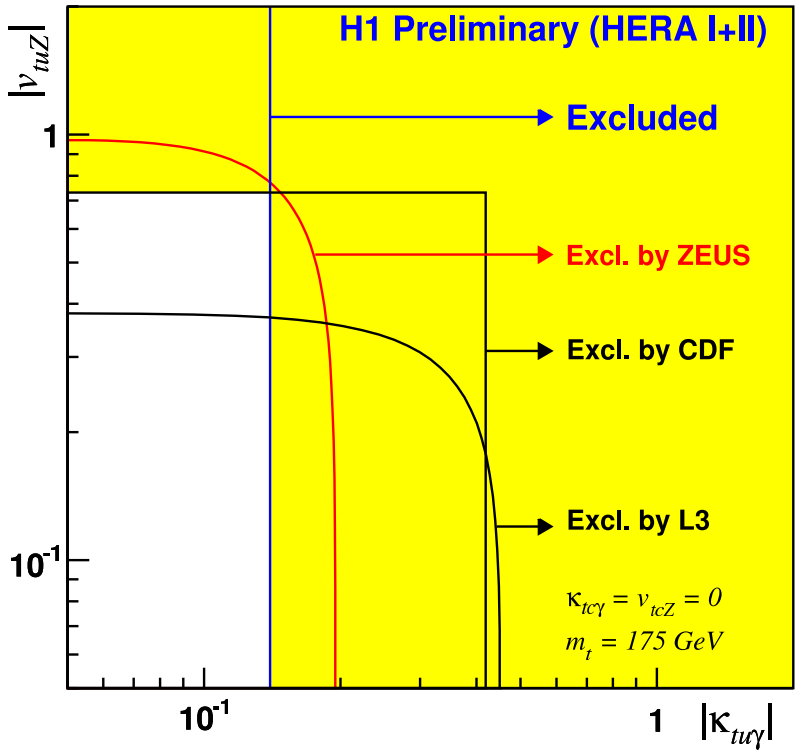
Anomale Einzelne Top Production bei HERA

HERA liefert genug Energie um einzelne Topquark zu erzeugen

- SM Produktion (über W) zu klein
- Anomaler Produktion durch γ, Z
- Flavour ändernde neutrale Ströme

H1 & Zeus finden keine Abweichung vom SM:
Limits für anomale Kopplungen an γ und Z.

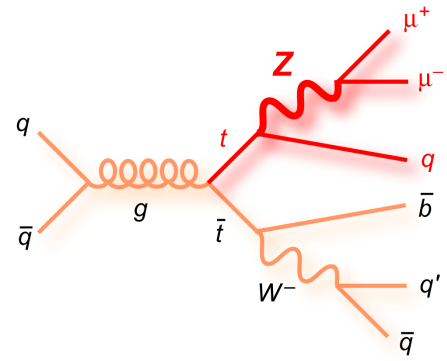
H1: Gesamter HERA Datensatz analysiert



Zerfälle

Flavour-ändernde neutrale Ströme (CDF)

Selektion: e^+e^- und $\mu^+\mu^- + 4$jets $\quad M_{\ell\ell} \approx M_Z$

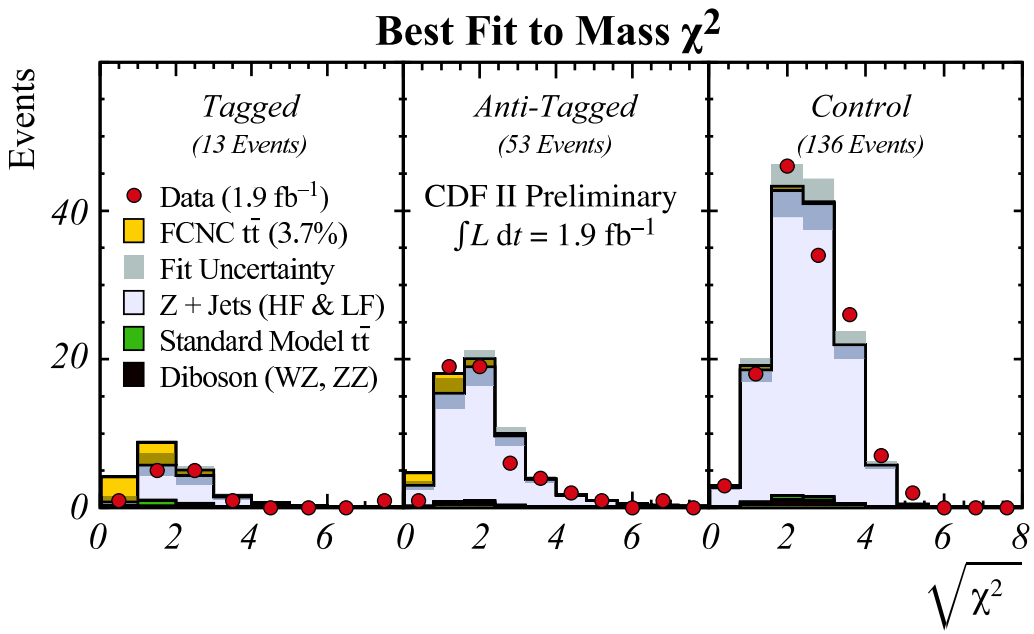


Bilde χ^2 aus Massenbedingungen
(Rekonstruierte top Massen und W-Masse)

Anpassung der χ^2-Verteilung an Signal und SM Simulation:

$B(t \to Zq) < 3.7\%$ (95% C.L.)

$L = 1.9\,\text{fb}^{-1}$

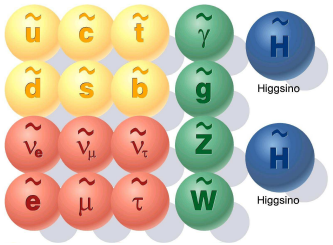


Viele weitere Resultate zum Top Quark

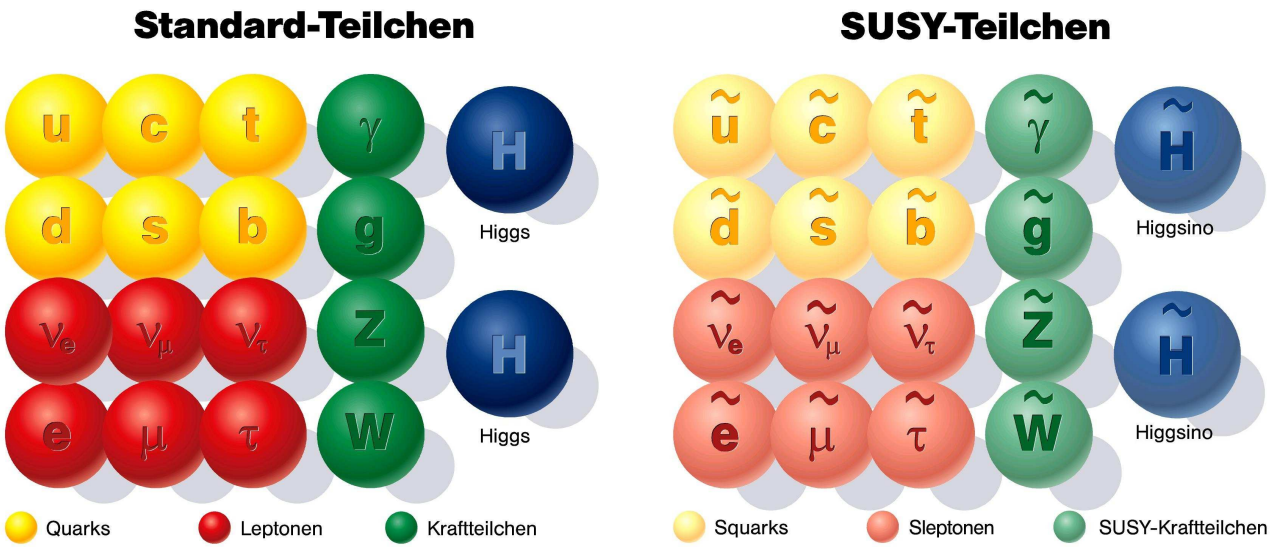
- Suche nach geladenem Higgs im Topzerfall
- W-Helizität im Top Zerfall
- Produktion von sTop sQuarks
- Vorwärts-Rückwärts-Asymmetrie der Topproduktion
- Messung der elektrischen Ladung des Topquarks
- Suche nach W'
- Breite des Top Quarks
- Lebensdauer des Top Quarks
- Messung des Produktionsanteile durch Quarks bzw. Gluonen.
- ...

Andere Fenster für neue Physik

- Weitere Fenster
  - Supersymmetrie
  - Spezielle Signaturen
  - Generische Suchen



Supersymmetrie



Viele andere Modelle

GUTs
Extra Dimension
Technicolor
. . .

SUSY Partner mit um $\frac{1}{2}$ anderen Spin für jedes SM Teilchen (2 Higgs-Dupletts)
Supersymmetrie ist eine gebrochene Symmetrie.

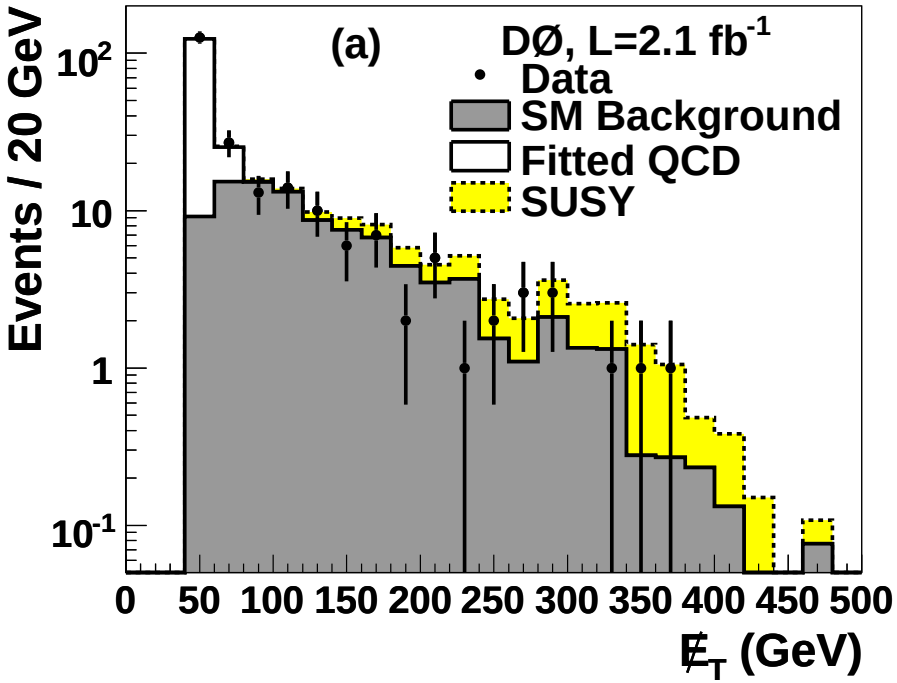
- Fermion- und Bosonschleifen heben sich auf (kein Hierarchieproblem)
- Lokale SUSY führt auf Gravitationsgleichungen (SUGRA)
- R-Parität Erhaltung: Neutralino (als LSP) Kandidat für dunkle Materie

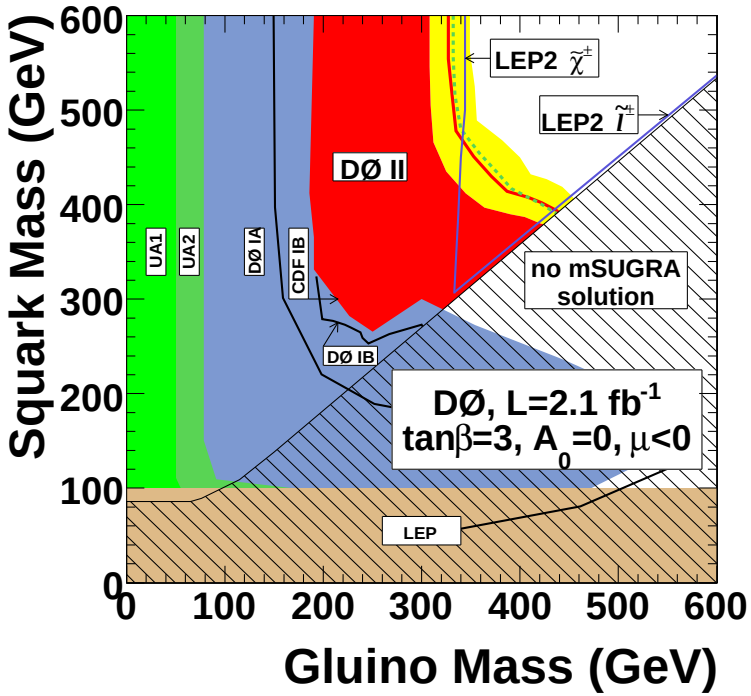
Viele freie Parameter, reichlich phänomenologische Varianten

Squark und Gluinos

...durch starke Wechselwirkung produziert.

Jets und $\not{E}_T$ (von LSP)





Dijets, Signal $m_{\tilde{q}} = m_{\tilde{g}} = 410\,\text{GeV}$

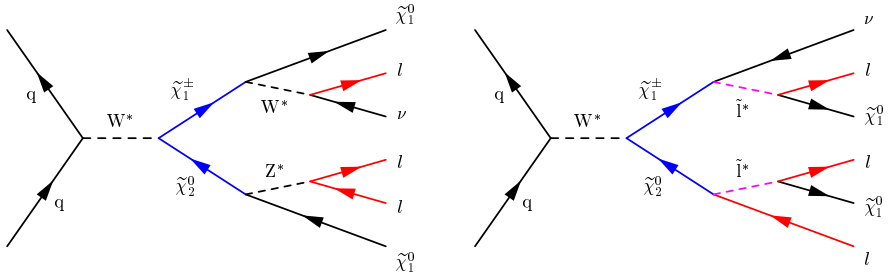
Ausschluß: $m_{\tilde{q}} \lesssim 380\,\text{GeV}$
$m_{\tilde{g}} \lesssim 320\,\text{GeV}$

Weder CDF noch DØ finden Signal

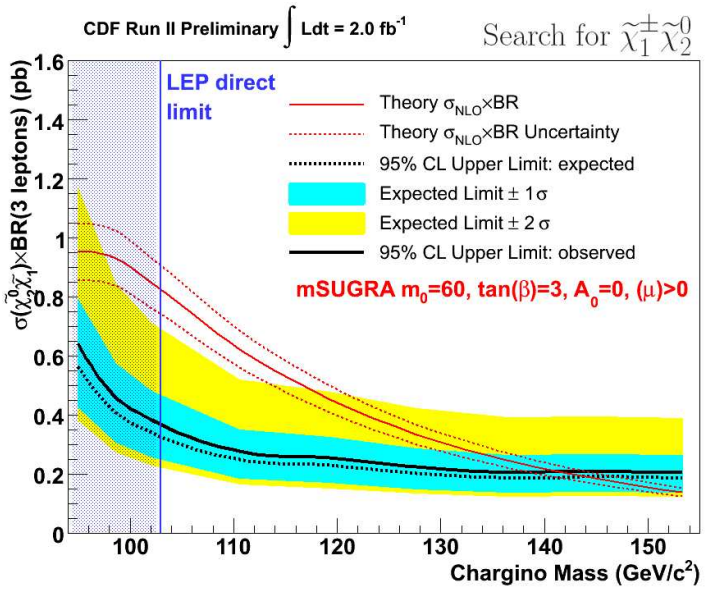
Charginos und Neutralinos: Trileptonsuche

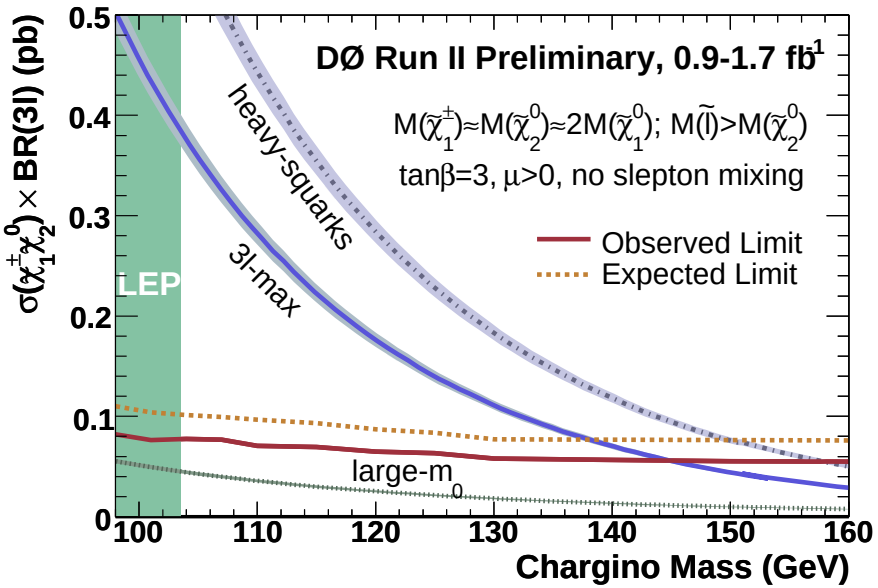
$\tilde{\chi}_1^{\pm}$-$\tilde{\chi}_2^0$-Paare entstehen aus W.

Zwei Zerfallswege in 3 Leptonen.



CDF und DØ sehen keine Abweichung vom SM und setzen Limits

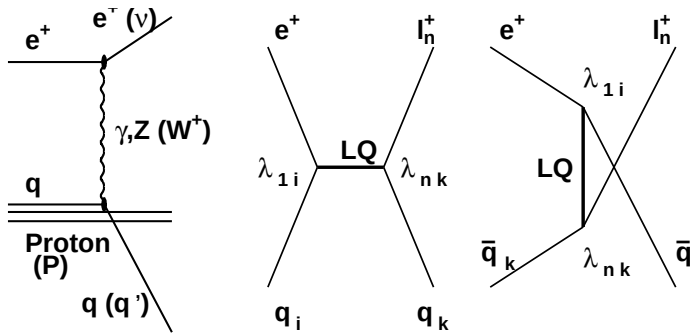


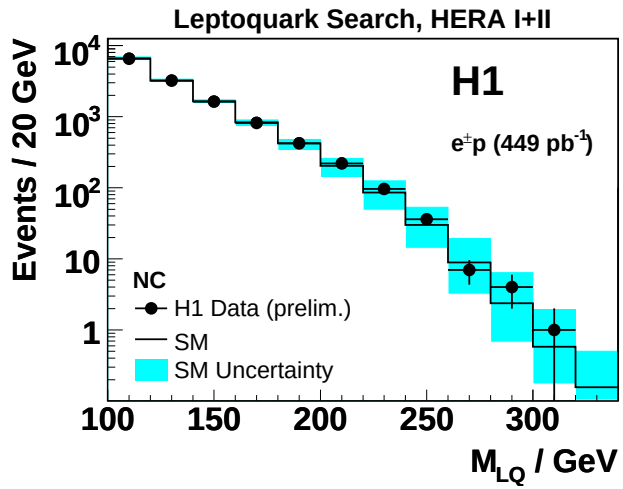


Ergebnisse sind für verschiedene Modelle, aber Sensitivität etwa vergleichbar.

Leptoquarks

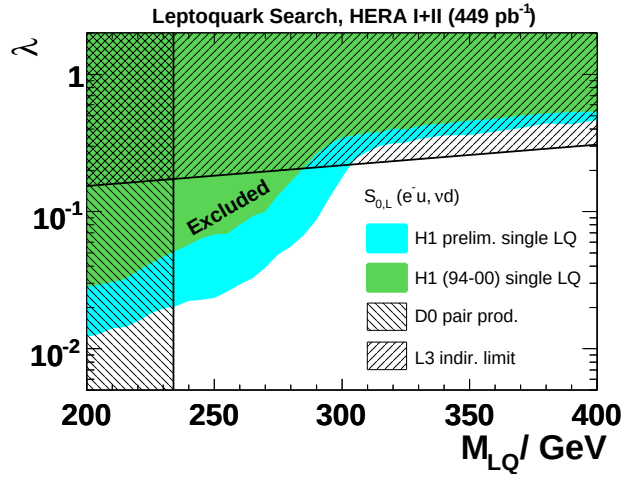
RPV SUSY und viele Grand Unified Theorien erwarten Leptoquarks
d.h. Bosonen die Quarks in Leptonen umwandeln





Experimentelle Signatur wie DIS (CC, NC)

Suche bei Ereignissen mit hohem Q^2
und bilde Massenspektrum



Keine Hinweise auf LQ Produktion

Grenzen abhängig von M_{LQ} und Kopplung:
Zusätzlicher Ausschluß unterhalb $M_{LQ} \approx 300\,\text{GeV}$

Spezielle Signaturen

Isolierte Leptonen und fehlende Transversalenergie

Signatur: Isoliertes Lepton, großes $\not{E}_T$ SM: q-l-ν (reelle W-Produktion)

HERA I

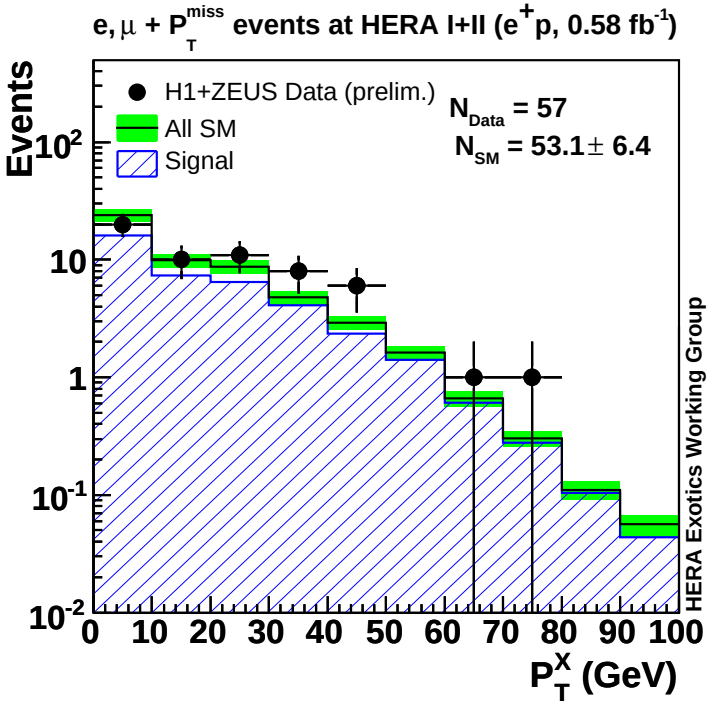
- H1 $\sim 3\sigma$ Überschuss in e^+p mit $p_T^X > 25$ GeV
- ZEUS kein Überschuss.

HERA I+II

Gemeinsame Analyse; angeglichene Schnitte

- Beobachtet: 23 Ereignisse
- Erwartet: 14.6 ± 1.9 1.8σ Überschuß

Aber: 17 der Ereignisse stammen von H1

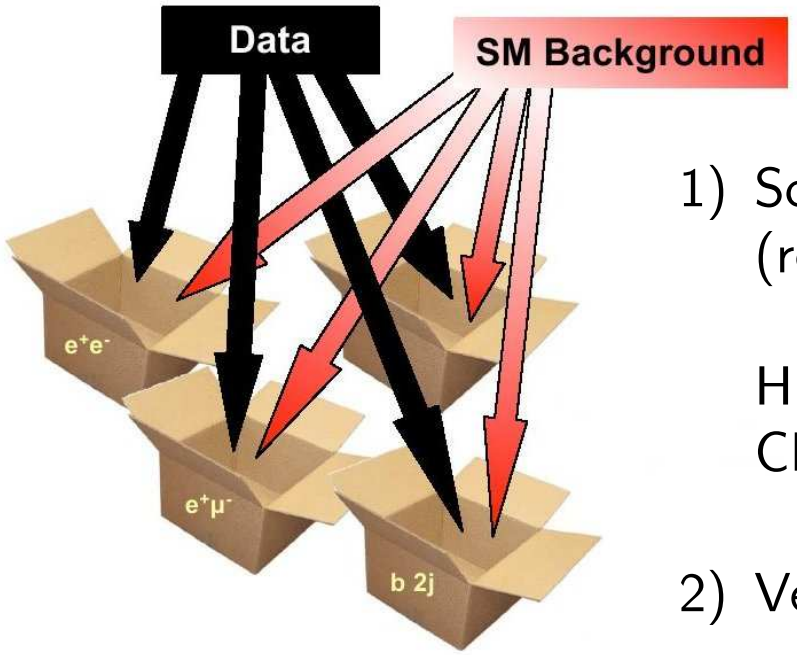


Konflikt zwischen den Experimenten ungelöst

Generische Suchen

Bedeuten die bisher gezeigten Resultate, daß es keine neue Physik gibt?

Vielleicht haben wir an der falschen Stelle gesucht!?



Analysen von CDF und H1

1) Sortiere Daten nach Physikobjekten
   (rekonstruierten Leptontyp, Photon, (b)-Jet, $\not{E}_T$)

   H1: Objektpaare ($p_T > 20\,\text{GeV}$)
   CDF: dazu Einzelobjekte mit erhöhter Schwelle

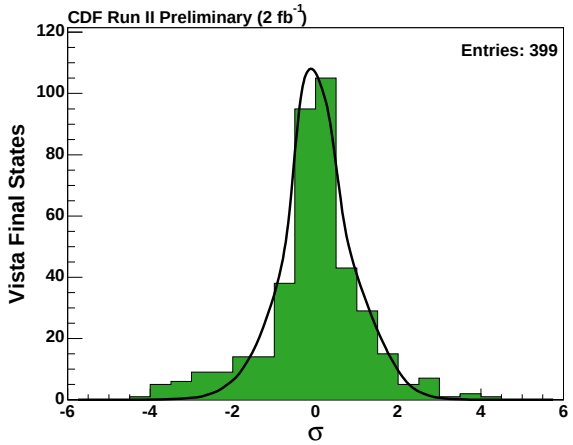
2) Vergleiche mit Simulation

Generische Suche bei CDF

Anpassung von 44 MC Korrekturfaktoren (Objekteffizienzen, Fehlid.raten, ...)

Ereignisraten

- 399 besetzte Kanäle
- Pull der Ereignisraten normalverteilt
- Übereinstimmung in Ereignisraten

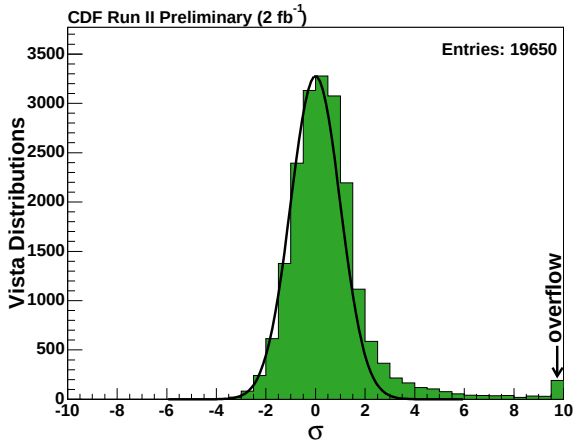


CDF Pull Raten

Kinematische Verteilungen

- Insgesamt 19650 kinematische Observablen
- ~ 550 Verteilungen mit Abweichung $> 5\sigma$

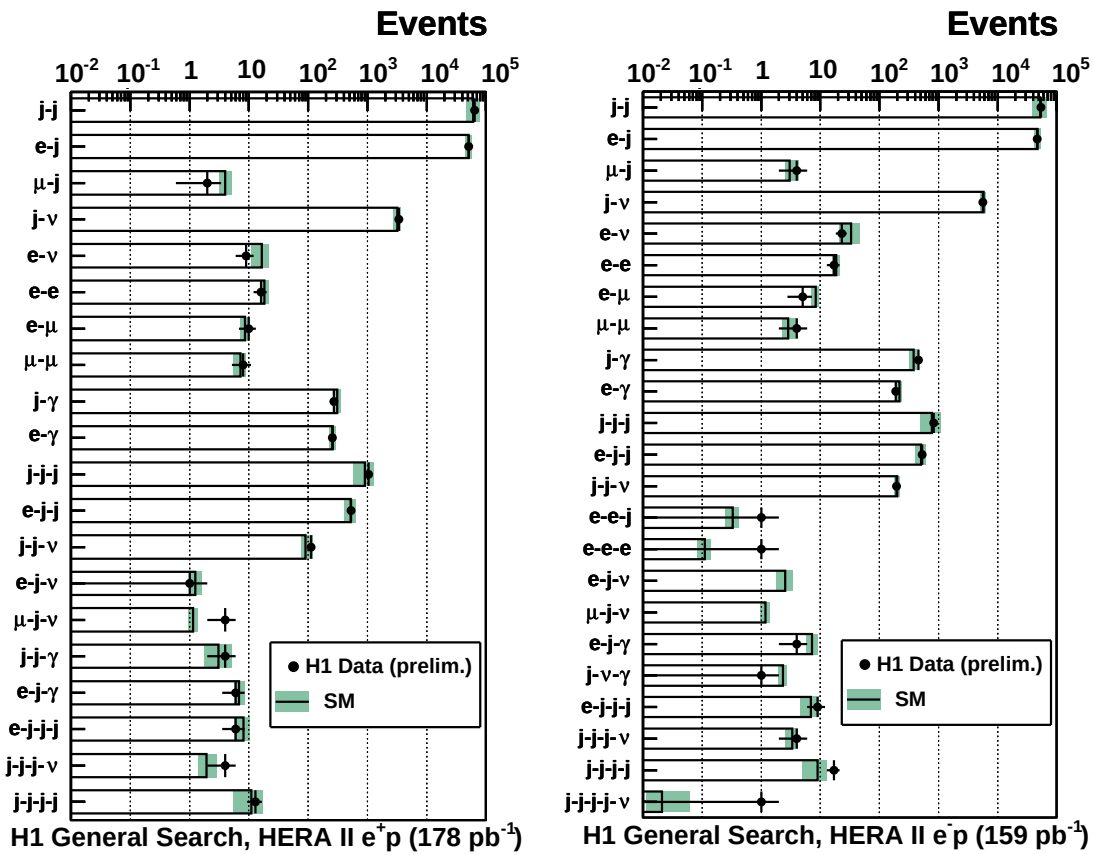
$\Rightarrow$ Neue Physik?? Nein.
Probleme bei Simulation erklärt Abweichungen
Keine Erklärung mit neuer Physik



CDF Pull Verteilungen

Generische Suche bei H1

23 Kanäle mit Daten werden getrennt nach e^+p, e^-p betrachtet



- Gefundene Raten stimmmen gut mit Erwartung
- Suche größte Abweichung in Verteilungen
- $\sum p_T$ und M_{all}

  Interessantest: μ-j-ν Kanal

  $\tilde{\mathrm{P}}_{\mathrm{SM}} = 2\%$

  Keine neue Physik

CDF: $\tilde{\mathrm{P}}_{\mathrm{SM}} = 8.5\%$

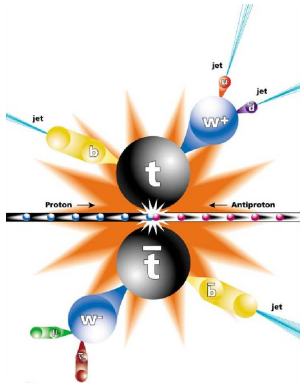
Methode findet Top in $100\,\mathrm{pb}^{-1}$

Keine offensichtlichen Abweichungen übersehen

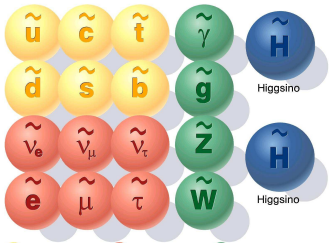
Zusammenfassung

Zusammenfassung

- Top Quark Physik
  - Das Top Quark bietet viele Fenster zu neuer Physik
  - Masse in der Vorhersage der Higgsmasse
  - Produktion und Zerfälle bei Tevatron und Hera



- Andere Fenster für neue Physik
  - Suche nach supersymmetrischen Teilchen
  - Spezielle Kanäle
  - Generische Suchen decken alle möglichen Kanäle ab



- *Bisher keine signifikanten Abweichungen von der Standard Modell Erwartung*